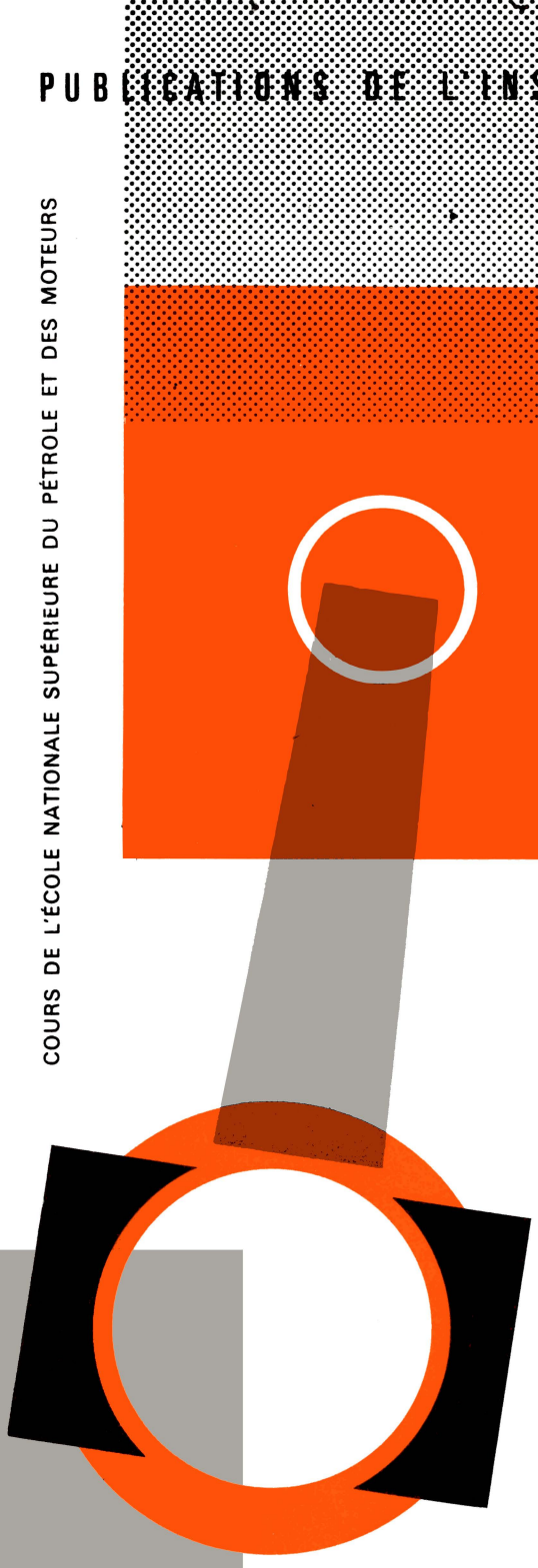
PUBLICATIONS DE L'INSTITUT FRANÇAIS DU PÉTROLE

COURS DE L'ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE DU PÉTROLE ET DES MOTEURS

YVES DURIER

# CARACTERISTIQUES DES CARBURANTS ET COMBUSTIBLES ET LEUR INFLUENCE SUR LE FONCTIONNEMENT DES MOTEURS



technip

SOCIÉTÉ DES ÉDITIONS TECHNIP

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
MINISTÈRE DE L'INDUSTRIE

DIRECTION DES CARBURANTS

INSTITUT FRANÇAIS DU PÉTROLE

ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE DU PÉTROLE
ET DES MOTEURS A COMBUSTION INTERNE

CENTRE D'ÉTUDES SUPÉRIEURES
DES MOTEURS A COMBUSTION INTERNE
ET DES APPLICATIONS DES PRODUITS DU PÉTROLE

# CARACTERISTIQUES DES CARBURANTS ET COMBUSTIBLES ET LEUR INFLUENCE SUR LE FONCTIONNEMENT DES MOTEURS

par **YVES DURIER**

Ingénieur A M., E.N.S.P M.
Chef du Service Technique Applications Moteurs
à la Compagnie de Raffinage Shell Berre

SOCIETE DES EDITIONS TECHNIP . 7 . rue Nélaton . PARIS XV$^{e}$

© 1958
INSTITUT FRANÇAIS DU PETROLE
et SOCIETE DES EDITIONS TECHNIP

Table des matières


| | Pages |
|---|---|
| INTRODUCTION | 11 |
| Première partie<br>CARBURANTS POUR AUTOMOBILES<br>ET MOTEURS D'AVIATION A PISTONS | 13 |
| CARACTERISTIQUE DENSITE ..... | 13 |
| Influence sur la carburation ..... | 14 |
| Influence sur la répartition ..... | 14 |
| Influence sur le rayon d'action ..... | 15 |
| Influence sur la consommation ..... | 15 |
| Evolution de la densité ..... | 17 |
| Précision de la mesure de densité ..... | 18 |
| Quelques indications d'ordre pratique sur la densité ..... | 18 |
| Caractéristiques légales ..... | 22 |
| CARACTERISTIQUE VOLATILITE ..... | 22 |
| Courbe de distillation A.S.T.M. ..... | 22 |
| Préparation du mélange carburé. Etat physique du mélange . | 23 |
| Evolution du mélange carburé ..... | 23 |
| La combustion ..... | 25 |
| Essais au banc et en utilisation ..... | 27 |
| Influence des hydrocarbures légers. Point 10 % ..... | 28 |
| Départs à froid ..... | 28 |
| Limite inférieure de volatilité pour départ à froid . | 29 |
| Limites supérieures de volatilité pour la période d'hiver | 30 |
| Le givrage des carburateurs ..... | 30 |
| Remèdes contre le givrage ..... | 31 |
| Méthodes d'essais de givrage ..... | 32 |
| Limite supérieure de volatilité pour la période d'été .. | 37 |
| Tampon de vapeur ..... | 37 |
| Percolation ..... | 44 |
| Influence des légers sur les mises en action ..... | 44 |
| Conclusion générale sur la richesse en légers d'un carburant | 45 |

Influence de la volatilité moyenne du carburant. Point 50 % .. 46
Processus de la reprise ..... 46
Méthodes d'essais ..... 49
Influence de la richesse en hydrocarbures lourds. Point 90 % ou point final ..... 49
a) Influence sur la consommation ..... 49
b) Influence sur l'encrassement. Auto-allumage. Perte de puissance ..... 50
Dépôts dans le système d'admission ..... 50
Dépôts dans la chambre de combustion ..... 50
c) Dilution de l'huile de graissage ..... 51
d) Répartition de la charge entre les différents cylindres 51
e) Répartition de la valeur antidétonante du carburant ... 52
1. Cas d'essences pures ..... 52
2. Cas d'essences éthylées ..... 52
f) Influence sur l'usure du moteur ..... 53
g) Action des queues de distillation sur la puissance massique ..... 54
Volatilité des essences pour l'aviation ..... 54
Remarque sur l'utilisation d'essence aviation dans une automobile ..... 55
Conclusions générales sur la caractéristique volatilité des carburants ..... 55
Caractéristiques légales de distillation ..... 55
Essences spéciales ..... 57

POUVOIR CALORIFIQUE ..... 59

Consommation en carburant ..... 60
Pouvoir calorifique de la cylindrée ..... 61
Quelques données pratiques sur le pouvoir calorifique .. 62

CHALEUR DE VAPORISATION ..... 64

Relation entre la puissance, la consommation d'un moteur et la "chaleur de vaporisation" du carburant ..... 65
Compromis puissance-consommation ..... 65
Cas des carburants de compétition ..... 66
Problème de la course ..... 66
Composition d'un carburant pour la course ..... 67
Remarque sur la puissance possible des moteurs de course ..... 68
Cas de l'alcool et des mélanges alcoolisés ..... 70
A. Utilisation de l'alcool pur dans un moteur à essence 70
B. Utilisation de mélanges essence-alcool déshydraté 70

Les mélanges essence-alcool et la consommation .. 70
Inconvénients des mélanges alcoolisés ..... 71
Avantages de l'alcool ..... 73

TENSION DE VAPEUR ..... 73

1. Influence sur le départ à froid d'un moteur d'automobile.. 74
2. Influence sur le fonctionnement à chaud d'un moteur d'automobile..... 75
3. Tampon de vapeur en aviation..... 75
Normes légales pour les tensions de vapeur..... 76
Tension de vapeur calculée..... 76

INDICE D'OCTANE ..... 78

Rendement et indice d'octane ..... 78
Rendement d'une voiture ..... 78
Problèmes posés aux constructeurs pour l'amélioration du rendement global de la voiture..... 80
Rendement du groupe moteur ..... 80
Rendement du moteur nu. Bilan thermique ..... 81
Voies possibles dans l'amélioration du rendement . 81
Conclusion générale sur les questions de rendement du moteur ..... 84
Limite constituée par la valeur antidétonante du carburant. La détonation ..... 85
Mécanisme de la détonation ..... 85
Effets de la détonation ..... 86
Influence du taux de compression, du remplissage et de l'alésage sur la détonation ..... 87
Influence de l'avance à l'allumage sur la détonation ... 88
Influence du dessin de la culasse sur la détonation ..... 88
L'indice d'octane. Définition ..... 88
Principe de la mesure sur le C.F.R. Détection de la détonation..... 89
Remarque importante concernant l'indice d'octane . 90
Conditions de fonctionnement du C.F.R. pour les différentes méthodes de mesure ..... 91
Influence de l'indice d'octane sur le fonctionnement d'un moteur d'automobile en service ..... 92
a) Indice d'octane insuffisant ..... 92
b) Indice d'octane surabondant ..... 92
Influence de l'indice d'octane sur l'étude d'un moteur d'automobile ..... 93
Choix du taux de compression ..... 93

L'indice d'octane et la performance ..... 95
Incidence de l'augmentation du taux de compression sur les températures de fonctionnement du moteur ..... 96
Limitation à l'augmentation des taux de compression. Course à l'octane ..... 97
Conditions techniques de limitation ..... 97
Conditions économiques de limitation ..... 98
Taux de compression et indice d'octane futurs ..... 99
Remarque sur les taux de compression des moteurs de compétition ..... 100
L'indice d'octane des carburants aviation pour moteurs à piston ..... 101
Influence de l'indice d'octane sur le fonctionnement d'un moteur d'avion en service ..... 101
Influence de l'indice d'octane sur l'étude d'un moteur d'avion 102
L'indice d'octane en relation avec la compression et la suralimentation ..... 102
Choix de l'indice d'octane des carburants pour l'aviation.... 104
Problème du décollage en aviation ..... 105
Influence de la richesse sur la détonation. Causes ..... 107
1. Action retardatrice ..... 107
2. Action accélératrice ..... 108
Les méthodes de mesure de valeur antidétonante pour l'aviation ..... 108
Méthode F 3 pour mélange pauvre ..... 109
Méthode F 4 par suralimentation en mélange riche .... 109
Canevas de mesure par suralimentation en mélange riche ..... 111
Valeur antidétonante des carburants utilisés dans l'aviation française ..... 112
Tendances des carburants à l'allumage par point chaud. 113
Composition des carburants aviation ..... 114
— Moyens d'élever l'indice d'octane des carburants ..... 114
I. Traitement en raffinerie ..... 115
Octane des carburants en fonction des modes d'obtention ..... 116
a) Distillation directe ..... 116
b) Essence de dégazolinage ..... 116
c) Cracking thermique ..... 116
d) Distillat de cracking catalytique ..... 116
e) Essences de synthèse ..... 116
f) Reforming thermique ..... 116
g) Reforming catalytique ..... 117
h) Isomérisation catalytique ..... 118
Composition des essences à indice d'octane élevé.. 118
II. Mélange avec des produits d'addition ..... 118
III. Emploi de dopes antidétonants ..... 121

Le plomb tétraéthyle ..... 122
Evolution de la notion d'indice d'octane ..... 129
Variation de la valeur antidétonante avec le régime.
- Sensibilité ..... 130
Valeur antidétonante route des carburants ..... 131
Méthode Uniontown ..... 131
Méthode des courbes frontières ..... 132
Méthode Uniontown modifiée ..... 134
Méthode des courbes frontières modifiées ..... 135
Autre méthode ..... 136
Méthode des pourcentages ..... 138
Conclusion sur les différentes méthodes de mesure d'indice route ..... 139
Précision des méthodes de mesure d'indice d'octane
Besoin en octane d'une voiture ..... 141
Méthodes de mesures du besoin en octane d'une voiture.
Méthode des courbes frontières ..... 143
Méthode CRC-E 1-943 ..... 143
Méthode CRC-E 1-748 ..... 143
Besoin en octane avec les carburants du commerce 143
Etude du besoin en octane d'un parc ..... 144
Précision. Reproductibilité des méthodes de mesure 144
du besoin en octane ..... 146
Variations des exigences en octane d'une voiture .. 146
Problème de l'adaptation du carburant à la voiture .... 147
Problèmes du constructeur de moteurs ..... 148
Problèmes posés aux raffineurs pour l'amélioration de la valeur route des carburants ..... 151
Recherches sur la détermination des indices route à partir d'essais de laboratoires ..... 154
Mesure des indices d'octane au-dessus de 100 pour les carburants ..... 158

LES GOMMES ..... 159

Processus de formation des gommes ..... 159
Influence des gommes sur le fonctionnement du moteur ..... 160
Point chaud de la tubulure d'admission ..... 160
Soupape d'admission ..... 161
Action des gommes de l'essence dans la chambre de combustion ..... 161
Teneur en gommes des carburants. Gommes actuelles et potentielles ..... 162
Remarque sur le benzol ..... 163
Normes légales ..... 163
Les gommes dans les réservoirs des voitures ..... 163

Corrélation entre les gommes A.S.T.M. et l'encrassement de l'admission. Autres méthodes ..... 163

SOUFRE ..... 164

Interaction du soufre et du plomb dans les carburants .. 165
Action du soufre du carburant sur le moteur ..... 165

COULEUR ..... 165
ODEUR ..... 166

Deuxième partie
COMBUSTIBLES
POUR TURBINES A GAZ D'AVIATION 167

Problèmes particuliers à la turbine à gaz d'aviation ..... 167

DENSITE ..... 168

Influence de la densité sur le rayon d'action ..... 168
Influence de la densité sur les dépôts de carbone dans les chambres de combustion ..... 169
Influence de la densité sur le degré d'atomisation ..... 169

COURBE DE DISTILLATION ..... 170

I. Influence des hydrocarbures légers ..... 170
a) Allumage au démarrage et réallumage en altitude ... 170
b) Rendement de combustion ..... 171
c) Stabilité de la flamme ..... 171
d) Tampon de vapeur et désamorçage des pompes en altitude ..... 172
e) Pertes par évaporation en altitude ..... 172
f) Risques d'incendie ..... 173
g) Répartition des températures dans le tube de flamme. Surchauffe des aubages ..... 174
II. Influence des hydrocarbures lourds ..... 175
Pouvoir calorifique au litre ..... 175
Approvisionnement en combustible ..... 175
Formation de dépôts ..... 175
Rendement de combustion ..... 175
Point final et congélation ..... 176
Conclusions sur la volatilité ..... 176

Volatilité des combustibles actuellement utilisés ..... 177

TENSION DE VAPEUR ..... 177
COMPOSITION CHIMIQUE DES COMBUSTIBLES ..... 177
CONGELATION DU COMBUSTIBLE ..... 177

Processus de congélation ..... 180

TENEUR EN EAU ..... 182
TENEUR EN SOUFRE ..... 183
COMBUSTIBLES UTILISES SUR LE MARCHE FRANÇAIS ... 184

Troisième partie
LES HUILES COMBUSTIBLES
POUR MOTEURS DIESEL 185

Choix du combustible ..... 185
Les combustibles du marché français ..... 186
Remarques sur les combustibles de mélange ..... 186

DENSITE ..... 187
POUVOIR CALORIFIQUE ..... 187
DISTILLATION ..... 188
VISCOSITE ..... 189

Variations de la viscosité en fonction de la température et de la pression ..... 190

INDICE DE CETANE ..... 192

Influence de l'indice de cétane sur le fonctionnement des moteurs ..... 192
Diesel Index ..... 193

MATIERES ASPHALTIQUES ..... 195

Asphaltènes durs ..... 195
Asphaltènes mous ..... 195

CENDRES ..... 196

Remarques sur l'épuration des combustibles pour moteurs Diesel ..... 196

INDICE CONRADSON ..... 198
SOUFRE ..... 199

Effets du soufre ..... 200
Remarques sur l'usure des chemises ..... 202
Effets secondaires du soufre ..... 203

CONGELATION ..... 203

Indice de cétane et congélation ..... 204
Réchauffage ..... 204

INFLAMMABILITE ..... 205
COULEUR ..... 205

Quatrième partie
LES HUILES COMBUSTIBLES
POUR TURBINES A GAZ INDUSTRIELLES 206

Généralités ..... 206
Caractéristiques principales des fuels pour turbines à gaz industrielles ..... 207
Le soufre ..... 207
Teneur en cendres ..... 207
Influence du vanadium ..... 208
Influence du sodium ..... 208
Solutions permettant de réduire les effets des impuretés .... 208

Cinquième partie
COMBUSTIBLES POUR FUSEES 211

Généralités ..... 211

# INTRODUCTION

Il y a une vingtaine d'années, le constructeur dessinait son moteur sans se préoccuper des caractéristiques physiques ou chimiques du combustible qu'il voulait brûler. Un moteur était fait pour brûler de l'essence, du pétrole, du gas-oil, de la naphtaline ou toute autre chose; cette spécification était jugée suffisante. Le progrès dans la construction des moteurs et dans les connaissances de la thermodynamique et des lois de la combustion ont amené progressivement à penser qu'il existe un lien étroit entre les caractéristiques du carburant et les performances du moteur. L'à peu près, maintenant, n'est plus admissible et la recherche du rendement et de la performance maxima ne se conçoit plus sans la connaissance des caractéristiques du carburant que l'on veut utiliser.

Le but de ce cours est de préciser les relations carburant-moteur. Nous aurions pu traiter ce sujet de deux manières : analyser chacun des points qui composent ce que l'on peut appeler la performance du moteur (puissance, consommation, reprises, agrément de conduite, etc.) et indiquer, pour chacun d'eux, les caractéristiques du carburant qui s'y rapportent. Nous avons préféré, pour des raisons de clarté dans l'exposé, prendre pour cadre chacune des caractéristiques du carburant et examiner, pour chacune d'elles, son influence sur la performance; ce cadre,qui peut sembler rigide, devant être assoupli en considérant que les performances requièrent souvent des qualités contradictoires du carburant amenant automatiquement au choix d'un compromis.

Nous commencerons l'examen de ces caractéristiques par la plus simple qui est la densité.

Première partie

# CARBURANTS POUR AUTOMOBILES ET MOTEURS D'AVIATION A PISTONS

## CARACTERISTIQUE DENSITE

La densité d'un carburant est le rapport du poids d'un certain volume de carburant à 15°C au poids du même volume d'eau à 4°C. Cette caractéristique se donne généralement à 15°C. Elle se détermine au densimètre et au picnomètre.

La densité dépend de l'origine du carburant et des modalités de sa production. Sa détermination présente un intérêt pour l'identification d'un carburant, mais ne peut en aucun cas constituer un critérium de sa qualité. On pouvait admettre autrefois, dans une certaine mesure, que l'essence était d'autant "meilleure" que sa densité était plus basse. L'apparition de nouvelles méthodes de production comme cracking thermique, catalytique, reforming, platforming, etc. font que ceci n'est plus valable. L'expérience montre en effet que telle essence aromatique à forte densité présente sur une paraffinique à faible densité des qualités antidétonantes et des consommations plus faibles en utilisation. Etant entendu que la densité ne peut donner une idée de la qualité du carburant, il est néanmoins intéressant d'examiner dans quelles mesures ses variations peuvent influer sur le fonctionnement du moteur.

## INFLUENCE SUR LE REGLAGE DE LA CARBURATION

Le débit du gicleur, tout au moins dans les carburateurs du type le plus répandu dit "à gicleur noyé", est fonction, d'une part, de la dépression qui règne dans la buse du carburateur et, d'autre part, du niveau du carburant au-dessus du gicleur noyé, ce niveau étant maintenu sensiblement constant dans la cuve par le flotteur. Si on utilise une essence à faible densité, le flotteur a tendance à s'enfoncer plus, mais sa position relative étant invariable, le niveau au-dessus du gicleur est plus élevé. Il s'ensuit un enrichissement qui peut entraîner à des consommations élevées sans gain de puissance appréciable et peut même provoquer des débordements et des fuites d'essence au carburateur. Inversement, si on utilise une essence à forte densité, le niveau dans la cuve est relativement bas. Il s'ensuit un appauvrissement du mélange carburé et le moteur ne donne pas toute sa puissance.

Les flotteurs des carburateurs étant habituellement réglés pour des densités comprises entre 710 et 745, il y a lieu, en dehors de ces limites, de procéder à un réglage du niveau.

## INFLUENCE SUR LA REPARTITION ENTRE LES DIFFERENTS CYLINDRES DU MOTEUR

Le mélange carburé, préparé par le carburateur, est distribué par la tubulure d'admission. Ce mélange est constitué par de l'air comburant, de la vapeur d'essence et enfin par de l'essence liquide à l'état de gouttelettes plus ou moins grosses. Si l'on remarque que dans un moteur qui tourne à 3 000 tours par minute, on impose à la veine carburée 100 changements de direction à la seconde, et ceci à des vitesses de l'ordre de 70 ou 80 mètres par seconde, on conçoit que l'inertie des gouttelettes, donc leur dimension et leur poids, joue un grand rôle dans la répartition du mélange entre les différents cylindres. Avec une essence dense, donc de viscosité relativement élevée, les gouttelettes transportées dans la veine carburée seront normalement plus grosses et leur inertie plus élevée; elles suivront plus difficilement les changements de direction imposés à la veine carburée, entraînant des inégalités de répartition. Les cylindres 1 et 4 en bout de tubulure seront normalement plus riches que les 2 et 3. Cette inégalité

dans les charges admises dans les différents cylindres entraîne des irrégularités dans le couple, qui à leur tour peuvent provoquer des vibrations de l'ensemble du moteur. Non seulement le moteur ne "tourne plus rond" mais il ne donne pas toute sa puissance. Ceci est surtout important pour les moteurs d'aviation où les irrégularités du couple moteur peuvent donner lieu à des résonances dans la cellule et les ailes. Ceci ne veut pas dire que les essences denses soient inférieures en utilisation aux essences légères, mais seulement que le dessin des tubulures d'admission et l'étude de la répartition doivent tenir compte de certaines limites de densité des carburants.

## INFLUENCE SUR LE RAYON D'ACTION

La densité est importante à envisager au point de vue des performances de l'avion, dans la détermination du poids de combustible à emporter et de la charge utile. L'emploi d'une essence à forte densité peut n'offrir aucun inconvénient pour de longs parcours, car les consommations en volume sont en général plus faibles avec les essences denses.

## INFLUENCE DE LA DENSITE DU CARBURANT SUR LA CONSOMMATION EN LITRES

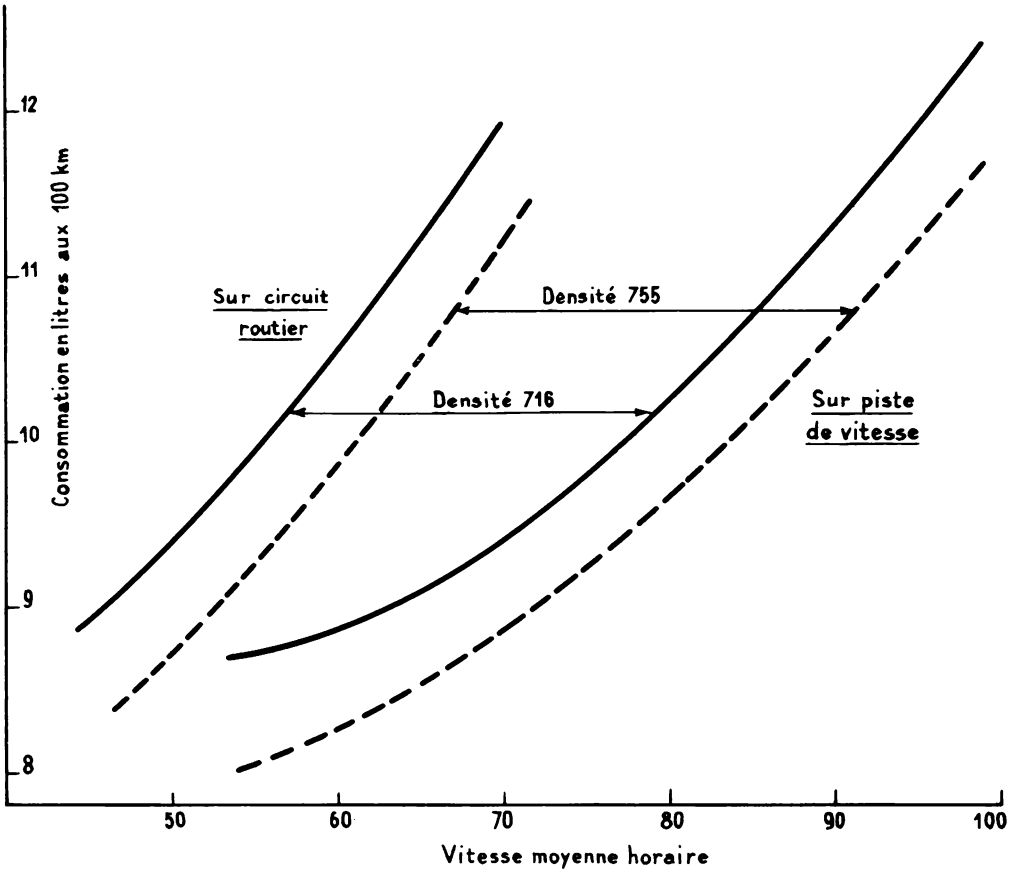
La substitution sans autre réglage d'un carburant de densité 740 en remplacement d'un à 710, par exemple, fait apparaître, à égalité de performance, un gain de consommation. Ce gain résulte de l'augmentation du pouvoir calorifique au litre (il y a plus de calories dans un litre d'essence à 740 que dans un litre à 710) et aussi à un léger freinage des lois d'écoulement dans les gicleurs. Les débits de carburant sont en effet sous charge constante inversement proportionnels aux racines carrées des densités:

$$\text{Débits} = \frac{K}{\sqrt{D}}$$

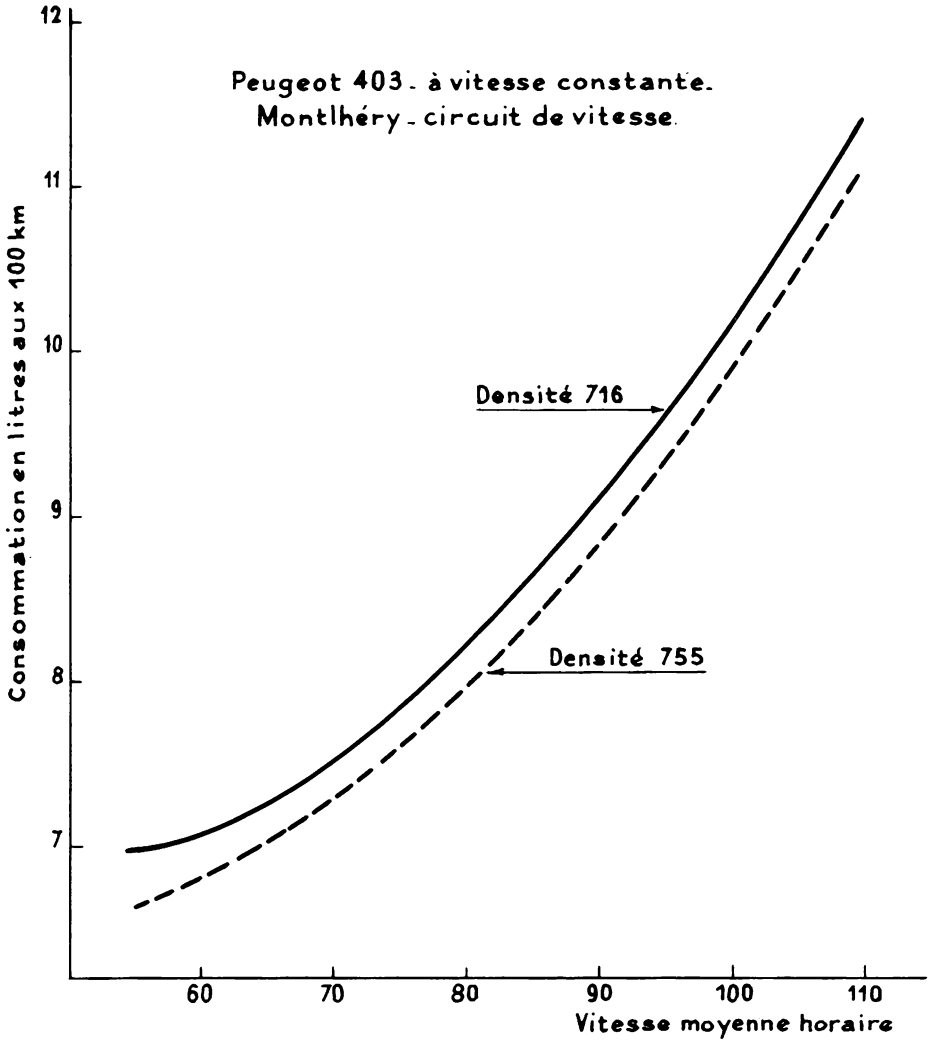
Cette réduction de consommation a été mise en évidence par des essais précis de consommation à Montlhéry avec des essences de volatilité sensiblement identique, mais différentes pour les densités (voir courbes ci-après).

Entre une essence à 710 et une à 740, les différences de consommation en faveur de la plus dense varient entre 3 et 7 % selon les voitures.

Ajoutons que les essences étant vendues au litre, la clientèle a intérêt à utiliser des essences relativement denses.




Influence de la densité sur la consommation. Citroën 11 ch




Influence de la densité sur la consommation

EVOLUTION DE LA DENSITE DE NOS CARBURANTS

Nous constatons depuis quelques années une tendance à la baisse des densités de nos essences. Il n'est pas rare, en 1958, d'enregistrer des densités de l'ordre de 710 et même 700, alors que nos moyennes d'il y a quelques années étaient encore à 730-735. Cette baisse tient d'abord à l'origine du brut paraffinique du Moyen-Orient qui entre maintenant pour 90 % des bruts traités en France; elle tient ensuite à la demande croissante en carburants à indice d'octane élevé qui

oblige à des traitements donnant beaucoup de légers, de gaz dont les débouchés sont restreints en attendant le développement de nouvelles industries chimiques utilisant ces gaz. Elle tient enfin dans une mesure encore faible, mais qui peut devenir importante, à la demande en carburant pour turboréacteur, type JP 4, qui mord sur les fractions de queue des essences et qui, par conséquent, diminue la densité.

Pour l'avenir, le développement de nouveaux traitements, tels que le reforming catalytique, conséquences de la "course à l'octane" devrait faire remonter les densités de nos carburants français à un niveau plus satisfaisant.

### Précision de la mesure de densité

Les mesures sont couramment effectuées avec un densimètre, cet instrument construit suivant des normes standardisées permet d'obtenir une densité à 0,0005 près.

## QUELQUES INDICATIONS D'ORDRE PRATIQUE SUR LA DENSITE

La densité varie avec la température, selon la loi :

$$d_t = d_{15} + Kt$$

où :

$d_t$ est la densité à la température t;

$d_{15}$ est la densité à la température de 15°C;

K est un coefficient positif si $t < 15°C$;
négatif si $t > 15°C$.

On prendra, en fonction de la densité :

| Densité à 15°C | 0,60 | 0,70 | 0,80 | 0,90 | 1,00 |
|---|---|---|---|---|---|
| K = | 0,0010 | 0,00087 | 0,00072 | 0,00067 | 0,00061 |

En Amérique, on exprime la "gravity" en degrés A.P.I. définis par la relation :

$$\text{degré A.P.I.} = \frac{141,5}{\text{densité } 60°/60° \text{ F}} - 131,5$$

Le terme "60°/60°F" représente la densité à 60°F prise par rapport à l'eau à 60°F. La correspondance est donnée par le tableau ci-dessous :

| Degrés A.P.I. | Densité à 15°C |
|---|---|
| 0 | 1,0760 |
| 1 | 1,0679 |
| 2 | 1,0599 |
| 3 | 1,0520 |
| 4 | 1,0443 |
| 5 | 1,0366 |
| 6 | 1,0291 |
| 8 | 1,0143 |
| 10 | 1 |
| 12 | 0,9861 |
| 14 | 0,9725 |
| 16 | 0,9593 |
| 20 | 0,9340 |
| 30 | 0,8762 |
| 40 | 0,8251 |
| 50 | 0,7796 |
| 58 | 0,7467 |
| 60 | 0,7389 |
| 62 | 0,7313 |
| 64,5 | 0,7220 |
| 66 | 0,7165 |
| 68 | 0,7093 |
| 70 | 0,7022 |
| 72 | 0,6953 |
| 74 | 0,6886 |
| 90 | 0,6388 |
| 100 | 0,6112 |

Rappelons que la température en degrés Fahrenheit est donnée par la relation :

$$T_{°C} = \frac{5}{9}(T_F - 32)$$

Densité de divers hydrocarbures et carburants

| | Densité | | |
|---|---|---|---|
| | 0°C | 15°C | 20°C |
| Acétate d'éthyle | | 0,850 | |
| Acétone | 0,814 | 0,798 | |
| Aniline | | 1,036 | |
| Benzène | | 0,884 | |
| Benzol à 90 % | | 0,882 | |
| Benzol à 50 % | | 0,876 | |
| Chlorure d'éthyle | | 0,925 | |
| Cyclohexane | | | 0,747 |
| Cyclopentane | | | 0,750 |
| Cumène | | 0,879 | |
| Decane | 0,747 | | |
| Diéthylacétal | | 0,931 | |
| Diméthylacétal | | | |
| Ethanol | | 0,794 | |
| Ethanol hydraté à 95 % | | 0,809 | |
| Ethanol hydraté à 90 % | | 0,823 | |
| Ethanol hydraté à 80 % | | 0,849 | |
| Ether éthylique | | 0,702 | |
| Ether diisopropylique | | 0,729 | |
| Ether isopropylique | | 0,729 | |
| Ether sulfurique | | 0,736 | |
| Heptane | 0,700 | | |
| Heptylène | 0,785 | | |
| Hexylène | 0,692 | | |
| Hexane normal | 0,677 | | |
| Isooctane | | 0,695 | |
| Isopentane | | | |
| Méthanol | | 0,803 | |
| Méthyléthyl cétone | | 0,812 | |
| Nitrobenzène | | 1,209 | |
| Octane normal | 0,718 | | |
| Paraldéhyde | | 0,981 | |
| Pentane normal | 0,645 | | |
| Toluène | | 0,870 | |
| Triptane | | | |
| Xylène (orto) | | 0,885 | |

Densités moyennes de quelques produits commerciaux à 15 °C

| | | | |
|---|---|---|---|
| Essence tourisme ordinaire | Marché français 1957-1958 | moyenne | 718 |
| Supercarburant | | | 722 |
| Essence aviation 100/130 | | | 710-715 |
| Essence aviation 115/145 | | | 700-705 |
| Réacteur aviation TR 0 | | | 785-790 |
| Réacteur aviation JP 4 | | | 760-765 |
| Réacteur aviation JP 5 | | | 805 |
| Réacteur aviation JP 6 | | | 785-790 |
| White spirits | | | 765-790 |
| Pétrole lampant ou kérosène | | | 780-790 |
| Gas-oil moteur | | | 825-840 |
| Fuel domestique | | | 840-845 |
| Diesel-oil marine | | | 850-855 |
| Fuel léger | | | 910-915 |
| Fuel lourd n° 1 | | | 955-960 |
| Fuel lourd n° 2 | | | 975-980 |
| Essences spéciales | A 40 - 100 | | 676 |
| | B 60 - 80 | | 678 |
| | C 70 - 100 | | 695 |
| | E 100 - 130 | | 728 |
| | F 100 - 160 | | 736 |
| | G 35 - 70 | | 645 |
| | H 45 - 155 | | 710 |
| Pétroles bruts | Kuwait | | 869 |
| | Irak | | 847 |
| | Tiaguana (Venezuela) asphaltique | | 982 |
| | Lagunilas (Venezuela) asphaltique | | 963 |
| | Qatar (Golfe persique) | | 920 |
| | Lacq asphaltique | | 922 |
| | Parentis | | 860 |
| | Sahara — Hassi-Messaoud | | 809 |
| | Sahara — Edjelé | | 848 |

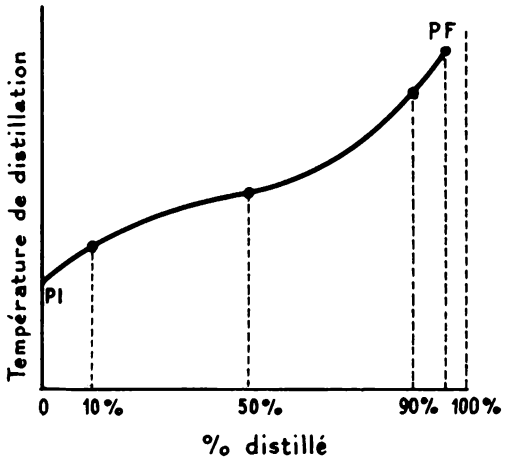
Caractéristiques légales de densité

| | | | |
|---|---|---|---|
| Essence ordinaire | (octobre 1957) | à 20°C max | 750 |
| Supercarburant | (octobre 1957) | à 20°C max | 760 |
| Pétrole lampant | | pas de spécifications spéciales | |
| Gas-oil moteurs | (septembre 1957) | min à 15°C | 820 |
| | | max à 15°C | 890 |
| Fuel-oils | | pas de spécifications légales | |

## CARACTERISTIQUE VOLATILITE

### COURBE DE DISTILLATION A.S.T.M.

Les essences sont des mélanges d'un grand nombre d'hydrocarbures ayant chacun des points d'ébullition différents.




Si l'on note, quand on effectue une distillation en laboratoire, la température à laquelle distille un certain volume d'essence, on obtient un certain nombre de points qui, réunis entre eux, donnent la "courbe de distillation". Les températures sont portées en ordonnées, les pourcentages distillés en abscisses. La volatilité caractérise l'allure générale de la courbe de distillation et non, comme on le pense souvent, la richesse en produits légers.

La "distillation" A.S.T.M., qui est un essai de laboratoire normalisé dans tous ses détails pour des raisons de bonne reproductibilité, ne représente qu'imparfaitement la vaporisation des hydrocarbures dans la tubulure d'admission d'un moteur. Néanmoins elle donne une idée suffisante des proportions relatives d'hydrocarbures légers, moyens et lourds contenus dans un carburant. C'est ainsi que le point 10 % de distillation A.S.T.M. peut caractériser suffisamment la richesse en hydrocarbures légers, le point 50 %, le niveau moyen de la volatilité d'ensemble, le point 90 %

ou le point final, la richesse en hydrocarbures lourds à points d'ébullition élevés.

L'examen de la courbe de distillation d'une essence nous renseigne immédiatement sur son comportement dans les moteurs, notamment en ce qui concerne les facilités de départ à froid, les mises en action, les facultés d'accélération, l'usure des chemises des moteurs, les dépôts, etc.

La bonne compréhension de l'influence des différents points caractéristiques de la "volatibilité" du carburant sur le fonctionnement du moteur nous oblige à faire auparavant une analyse succincte de ce qui se passe dans la tubulure d'admission du moteur et à définir ce que nous appellerons "l'état physique du mélange carburé".

## PREPARATION DU MELANGE CARBURE - ETAT PHYSIQUE DE CE MELANGE

A la sortie du gicleur du carburateur, l'essence est très finement pulvérisée. Le mélange carburé circulant dans la tubulure d'admission comprend : de l'air comburant, de l'essence liquide et de l'essence à l'état gazéifié. La proportion en poids :

$$\frac{\text{essence gaz}}{\text{essence à l'état liquide}}$$

constitue ce que nous appelons "l'état physique du mélange carburé" à un instant donné. Cet état physique varie constamment pendant le trajet de la veine carburée entre carburateur et cylindres.

## EVOLUTION DU MELANGE CARBURE

A la sortie du gicleur, l'essence est très finement pulvérisée à l'état de gouttelettes microscopiques. Au cours du trajet le long de la tubulure, ces gouttes s'agglomèrent et leurs dimensions grossissent. Les plus grosses ratent le premier virage de la tubulure d'admission et vont heurter le point chaud où elles sont probablement volatilisées (sauf caléfaction possible). La température de la tubulure, qui est très élevée au niveau du point chaud, va ensuite en décroissant jusqu'à l'entrée du cylindre, ce qui donne lieu à d'importantes condensations. On a pu observer, en ménageant des fenêtres en quartz dans des tubulures, et surtout en bout de tubulure, un ruissellement de gouttes analogue à des gouttes de pluie sur un carreau.

Un fait indéniable est, qu'à son arrivée dans les cylindres, une notable partie du carburant se trouve encore à l'état liquide sous forme de gouttelettes dont certaines peuvent atteindre plusieurs millimètres. Cette proportion de liquide est d'autant plus grande que la tubulure d'admission est plus froide, que la chaleur de vaporisation du carburant est plus grande et que la température extérieure est plus basse. Elle est plus considérable dans les charges réduites qui sont les plus fréquentes en utilisation courante.

L'agglomération en grosses gouttes est favorisée par la diminution du régime qui entraîne une diminution de vitesse de la veine carburée. Quelle est la proportion de liquide et de gaz d'essence qui se présente aux cylindres ? Elle dépend évidemment des caractéristiques du carburant et de celles du moteur. Certains chercheurs américains d'avant-guerre avançaient le chiffre d'un demi en poids (sous toutes réserves).

Si cette proportion était exacte pour la moyenne des voitures américaines, elle devrait être plus grande encore sur les voitures françaises dont les tubulures d'admission sont moins réchauffées; peut-être 1/3 gaz, 2/3 liquide ? En l'absence de toute mesure, en France, nous ne pouvons considérer ces chiffres que comme une indication très vague.

La température remonte ensuite à l'entrée dans les chapelles d'admission et la compression vient heureusement continuer la vaporisation. La vaporisation est-elle complète à la fin de la compression et en définitive brûle-t-on du gaz seul ou un mélange de gaz et de liquide ? C'est un point sur lequel les chercheurs ne sont pas d'accord: les partisans de la gazéification totale s'appuient sur le fait que la compression, les parois (voir remarque I), le mélange avec les gaz résiduels apportent beaucoup plus que les calories nécessaires à la vaporisation totale. Pour notre part, nous inclinons vers la seconde hypothèse en considérant le facteur temps comme essentiel (voir remarque II).

Remarque I :

En utilisation, l'apport des parois du cylindre peut être nul ou même négatif. Lors d'une reprise, par exemple, le moteur passant de 1 000 à 3 000 tours en quelques secondes, il est évident qu'il y a absorption de chaleur par les parois. Le moteur, en réalité, "court" toujours après son équilibre thermique. Celui-ci est réalisé seulement dans le cas d'un fonctionnement prolongé à régime et charge constants.

Remarque II :

Le temps de vaporisation d'une gouttelette d'essence, dans le cas

d'un état permanent en température et en pression, peut être représenté par la formule (Jalbert) :

$$\theta = \frac{1}{A} \frac{P^2}{(1 + n\delta) F}$$

où :

A est un coefficient dépendant de la surface d'évaporation de la gouttelette, donc de sa grosseur;
F la tension de vapeur maxima à la pression totale du mélange P;
n le nombre de grammes d'air pour brûler 1 g de combustible;
$\delta$ la densité de la vapeur du combustible par rapport à l'air.

On pourrait imaginer, pour se rendre compte des temps nécessaires à la vaporisation, tout au moins des ordres de grandeur, la projection et la photographie d'une goutte d'essence dans une enceinte de verre à la température et à la pression moyenne de compression.

Peut-on affirmer que le contact, pendant moins de 1/100 de seconde (pour un moteur tournant à 3 000 tours) d'une goutte d'essence de plusieurs millimètres de diamètre déjà débarrassée de ses produits légers, dans un milieu à température moyenne approximative de 160°C, puisse entraîner la vaporisation totale ? Nous ne le pensons pas. En tous cas, il serait téméraire d'affirmer le contraire et ce qui suit semble confirmer notre thèse, tout au moins pour les charges réduites, les plus fréquentes en utilisation.

Ajoutons que, dans le fonctionnement à charges réduites, les analyses de gaz d'échappement décèlent des quantités souvent appréciables d'hydrocarbures non brûlés qui, à la suite de condensations sur des parois relativement froides, ont traversé impunément la phase de combustion. Ce fait ne pourrait se produire si le combustible restait complètement à l'état de gaz.

## LA COMBUSTION

La combustion portera donc sur un mélange air-gaz résiduel-gaz d'essence et essence liquide. La qualité de cette combustion, qui déterminera en dernière analyse le rendement de combustion et la consommation, est fonction, d'une part, de l'état chimique (composition, groupement moléculaire, aptitude au cracking, etc.) et, d'autre part, de l'état physique du mélange au début de la combustion qui dépend lui-même de l'état physique au sortir de la tubulure d'admission.

Nous ne nous occuperons, pour l'instant, que de cet état physique

sur lequel la courbe de distillation de l'essence a une grosse influence.

Nous admettrons comme un axiome qu'un hydrocarbure à l'état gazeux brûle mieux que ce même hydrocarbure à l'état liquide.

Ceci pour deux raisons : une première est qu'il est beaucoup plus facile d'obtenir un mélange carburé homogène avec du gaz qu'avec du liquide, amenant ainsi un contact intime entre les molécules d'oxygène et les molécules d'hydrocarbures; une seconde, c'est que la combustion d'une sphère d'essence liquide se fait par l'extérieur, l'intérieur de la goutte manque d'oxygène; la conductibilité a peut-être le temps de jouer, entraînant le cracking du noyau central. En tous cas, même si toutes les calories sont utilisées, il y a retardement dans leur libération, donc baisse de rendement. En tout état de cause, si cette deuxième raison nous semble probable, mais non confirmée, la première nous semble indiscutable (voir remarque III).

Remarque III :

Le manque d'homogénéité et le fait qu'il y ait encore du liquide en fin de compression sont la cause du décalage de la richesse de puissance maxima et de la richesse théorique. On pourrait vérifier, par exemple, que dans le cas de carburation avec un gaz comme le propane, ce décalage est beaucoup moins prononcé qu'avec un carburant liquide.

La qualité de la combustion ou, ce qui revient au même, son efficacité sera maxima si tous les hydrocarbures sont vaporisés en fin de compression. Cette manière de voir est singulièrement renforcée par le fait que l'alimentation du moteur par du gaz (par exemple : propane ou gaz de ville) fait baisser la consommation en calories par cheval-vapeur par heure.

Nous avons indiqué ci-dessus que nous considérions que la qualité de la combustion était fonction de facteurs chimiques (composition, groupement moléculaire, rapport Carbone / Hydrogène et de facteurs physiques (gazéification, homogénéité). On peut se préoccuper de l'importance relative de ces facteurs.

Nous pensons que les progrès réalisables dans les rendements de combustion doivent venir de l'amélioration de ces deux sortes de facteurs, mais que les facteurs physiques devraient pouvoir nous apporter à moins de peine, donc plus rapidement, des gains de rendement substantiels. On ne peut nier, par exemple, l'efficacité, au point de vue du rendement, de nombreux appareils comme turbine, déflecteurs, etc. qui, situés dans la tubulure d'admission, contribuent à homogénéiser et à diminuer le diamètre des gouttes liquides du

mélange carburé, ce qui se traduit toujours par un gain de consommation. Malheureusement et malgré les affirmations contraires des inventeurs, tous ces appareils réduisent aussi la performance maxima.

Retenons de tout ce qui précède l'importance de l'état physique du mélange carburé en fin de compression, relativement à la qualité de combustion. Cet état physique dépend lui-même de celui existant à la sortie de l'admission et, finalement, pour un moteur donné, des caractéristiques du combustible, notamment celles de distillation, de chaleur de vaporisation et de tension de vapeur.

## ESSAIS AU BANC ET EN UTILISATION

Avant d'aborder l'étude même des performances du moteur en fonction de la caractéristique volatilité, faisons une dernière remarque sur la différence des essais du banc et en utilisation normale.

L'influence des caractéristiques distillation, très marquée en utilisation, l'est beaucoup moins au banc. Ceci tient à ce qu'au banc un essayeur digne de ce nom, avant de faire un point de la courbe de puissance ou de consommation, attend toujours que l'équilibre thermique correspondant à la charge et au régime soit réalisé. En utilisation, l'équilibre thermique n'est réalisé qu'à de très rares exceptions près; cet équilibre thermique est toujours décalé dans le temps, soit en avance, soit en retard et, de toute façon, il n'est jamais le même qu'au banc. C'est ainsi qu'au banc la courbe de puissance et de consommation est à peu près indépendante du point final du carburant parce qu'on dispose d'un volant thermique considérable et que, de toute façon, tout le carburant est vaporisé. Il n'en est absolument pas de même sur la route.

On cherche depuis longtemps à reproduire au banc les essais effectués sur la route, pour des raisons de prix de revient, de commodité et de reproductibilité, par exemple : essais d'huile de graissage, de soupapes, d'encrassement, d'indice d'octane route, etc. en chargeant un "programmeur" électromagnétique ou électronique de reproduire au banc les conditions de fonctionnement sur route. Le nombre des variables à régler est tel que cette reproduction est très imparfaite.

En fait, les essais au banc sont extrêmement utiles pour dégrossir un problème, mais ils doivent toujours être complétés par des essais route.

Pour en revenir à la caractéristique volatilité, nous avons vu que nous pouvions classer les hydrocarbures composant une essence

selon leurs points d'ébullition en "légers", "moyens" et "lourds" respectivement par les températures de distillation des points 10 %, 50 % et 90 % (ou point final).

Examinons maintenant l'influence de ces différents points sur le fonctionnement du moteur.

## INFLUENCE DES HYDROCARBURES LEGERS. POINT DE DISTILLATION 10 %

### Départs à froid

Les conditions de départ à froid d'un moteur résultent de la richesse réelle au voisinage de la bougie d'allumage. Le carburant qui n'est pas vaporisé et qui ruisselle à l'état liquide n'influe pas sur cette richesse. Il est donc nécessaire, pour que le moteur allume, d'avoir une quantité de carburant vaporisé suffisante pour que le mélange carburé au voisinage de la bougie soit au-dessus de la limite d'inflammabilité pauvre.

C'est ainsi que l'usage du starter se justifie par la nécessité d'introduire beaucoup d'essence liquide lors d'un départ à froid, pour être certain d'obtenir la petite quantité d'essence vaporisée nécessaire à l'obtention de la limite pauvre d'inflammabilité au voisinage de la bougie.

Ceci met en jeu deux caractéristiques de l'essence : d'une part, la tension de vapeur qui implique une qualité ou une aptitude à la vaporisation et, d'autre part, la richesse en produits légers qui implique une quantité d'essence vaporisée. Cette richesse en légers peut être caractérisée précisément par le point de distillation 10 % ou, ce qui revient sensiblement au même, par le pourcentage distillé à 70 °C.

En conclusion. - Les départs à froid seront d'autant plus faciles que la température de distillation des dix premiers pour cent de l'usure sera plus basse, ou encore que le pourcentage distillé à 70 °C sera plus élevé et aussi, évidemment, que la tension de vapeur de l'essence sera plus élevée.

La caractéristique tension de vapeur dépend d'ailleurs en grande partie pour des carburants normaux de la richesse en hydrocarbures légers.

En conséquence de ce qui précède les raffineurs ont tendance, l'hiver, à laisser le plus de légers possible dans leurs carburants.

Limite inférieure de volatilité pour départ à froid

Nous venons de voir qu'en ce qui concerne le carburant on atteindra d'autant plus facilement le minimum de vaporisation indispensable qu'il sera plus riche en légers et plus élevé en tension de vapeur.

En ce qui concerne le moteur, il devra amener par la compression les calories nécessaires pour obtenir ce minimum. Ces calories résultent d'une véritable course entre celles produites par la compression et les fuites par les parois. Le facteur temps intervient donc et ceci implique une vitesse minima du démarreur au-dessous de laquelle aucun départ n'est plus possible.

Il résulte d'essais effectués pendant l'hiver 1956, au col de Vars, sur une dizaine de voitures françaises des marques les plus répandues et par des températures comprises entre -15 et -20°C, ces essais étant effectués avec une dizaine de carburants à volatilité décroissante, que la volatilité la plus basse au-delà de laquelle aucune voiture ne peut plus partir est très éloignée de celle des carburants commerciaux courants et qu'en fait, sauf cas exceptionnel, les mauvais départs par grand froid ne doivent pas être imputés au carburant, mais bien à d'autres causes comme : batterie en mauvais état; emploi d'une huile trop visqueuse; mauvais état du système d'allumage, etc.

C'est ainsi, par exemple, que sur des voitures en bon état, après une nuit complète à -20°C, le départ était encore convenable avec un carburant n'ayant plus que 400 g de tension Reid et peu de produits légers puisque distillant 10 % à 70°C, l'essai ayant lieu avec une huile 10W30.

L'utilisation d'une SAE 20 à la place de la 10 W 30 avait pour effet de relever la limite de volatilité minima à 550 g de tension Reid avec un distillé 10 % à 60°C. Dans ce dernier cas, le démarreur tournait deux fois moins vite.

Les essais eux-mêmes consistaient en la mesure du temps de démarrage en tirant sur le démarreur pendant des périodes de dix secondes, espacées elles-mêmes de dix secondes. Le départ était considéré comme satisfaisant s'il avait lieu pendant la première période de dix secondes, comme acceptable s'il se produisait avant les trois premières périodes, comme impossible ensuite.

## Limites supérieures de volatilité pour la période d'hiver. Givrage

L'hiver, la satisfaction du conducteur croît avec la volatilité du carburant. Il apprécie beaucoup le fait de pouvoir démarrer par -10°C sans utiliser son starter avec une essence distillant 35 % à 70°C et 800 g de tension Reid.

Néanmoins, il y a une limite supérieure de volatilité pour la période d'hiver, cette limite est constituée par le givrage des carburateurs.

### Le givrage des carburateurs

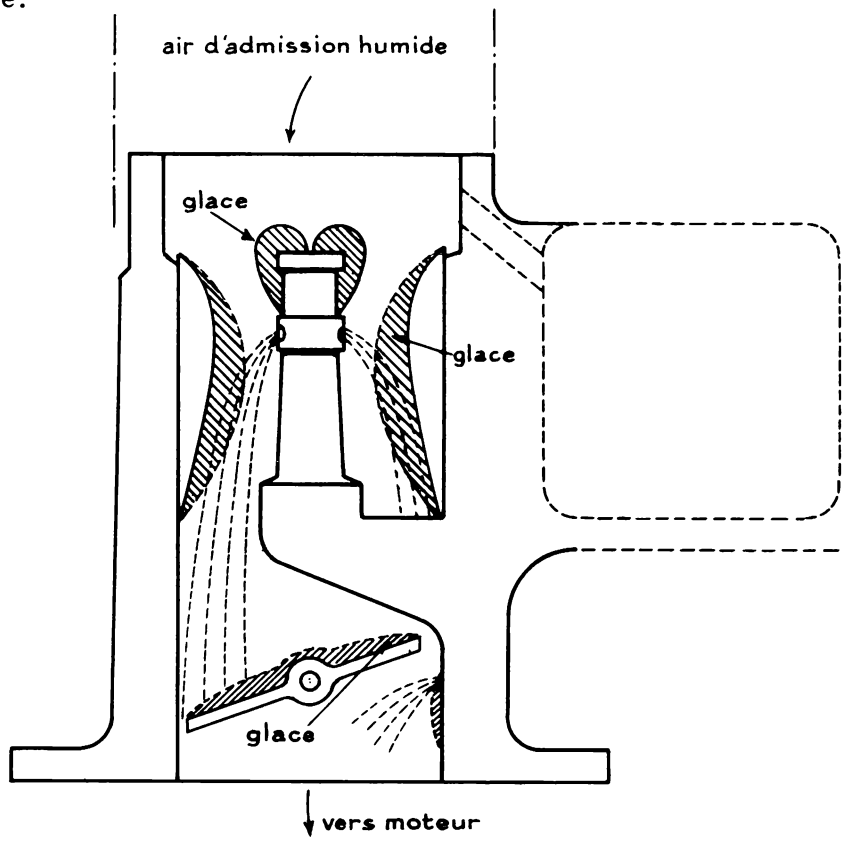
Le givrage des carburateurs est un inconvénient bien connu, surtout en aviation, mais qui a pris un regain d'importance depuis ces quatre dernières années où la course à l'octane a nécessité de nouveaux traitements en raffinerie comme le cracking catalytique, lesquels traitements produisent beaucoup de produits légers. Le givrage du carburateur peut se manifester sous deux formes :

- Une forme anodine qui consiste en le calage du moteur à un certain nombre d'arrêts de la voiture après départ à froid. Ces calages successifs qui, en se prolongeant, peuvent devenir extrêmement gênants, se produisent par temps humide à des températures normalement comprises entre 0 et 8°C. La vaporisation du carburant, en amont du papillon des gaz et dans le puits de ralenti, produit un refroidissement d'autant plus intense que la volatilité du carburant est plus élevée. L'humidité atmosphérique se transforme alors en glace au contact des parois froides et, en particulier, du papillon des gaz. Cette glace s'accumule et à chaque fermeture du papillon le moteur cale par étouffement; au bout d'un certain temps les calages cessent, le réchauffement par conductibilité faisant fondre les cristaux de glace.

- Une autre forme au moins aussi gênante, se produisant en marche normale à chaud, consiste en l'obstruction partielle de la buse du carburateur par de la glace, à la suite par exemple du passage de la voiture dans une nappe de brouillard; il s'ensuit un enrichissement du mélange carburé avec formation de fumée noire à l'échappement, une baisse de puissance notable et pouvant même aller jusqu'à l'arrêt total par étouffement.

La baisse de température consécutive à la vaporisation du carburant peut atteindre en pratique de 8 à 12 degrés selon la volatilité. Le givrage ne se produit plus par temps très froid où l'air est généralement sec.

Certaines voitures sont beaucoup plus sensibles que d'autres au givrage; par exemple celles dont la ventilation du capot est très intense.




Givrage du carburateur

Remèdes contre le givrage

C'est avant tout une question de construction, de disposition générale de réchauffage et de ventilation sous le capot. La grande majorité des voitures actuelles ne givrent plus quelle que soit la volatilité du carburant (réchauffage du carburateur, adoption de dispositifs thermostatiques accélérant le réchauffage de l'eau, ventilateur débrayable, etc.).

De son côté, le raffineur peut lutter contre le givrage en incorporant des dopes antigivre à son carburant. Ces dopes sont de deux sortes :

- Ceux absorbant l'eau, genre alcool, qui agissent par abaissement du point de congélation. Ce sont les plus efficaces, mais aussi

souvent les plus chers; ils doivent être utilisés dans des proportions de l'ordre du pour-cent pour être efficaces.

- Ceux agissant par surface ou "tensio-actifs". Leur action est telle que la glace formée n'adhère pas aux parois du carburateur, cette glace est aspirée par le moteur au fur et à mesure de sa formation. Les doses utilisées sont de l'ordre du millième en volume et ils sont relativement moins chers que les dopes "absorbeurs". Par contre, les résultats obtenus sont plus irréguliers.

Méthodes d'essais de givrage

On peut se proposer de déterminer en l'absence de tout dope quelle est la limite supérieure de volatilité d'un carburant à ne pas dépasser (tension de vapeur et richesse en légers) pour ne pas risquer de givrage sur un parc de voiture donné. On peut d'autre part chercher, pour un carburant donné d'hiver à haute volatilité, la proportion de dope susceptible d'éliminer le givrage. Ce deuxième genre d'essais permet de classer les différents dopes par efficacité.

Ces deux buts différents, l'un concernant la volatilité, l'autre la recherche du dope, peuvent être atteints par les méthodes suivantes dont nous exposerons seulement le principe :

a) Méthode d'essais pour la recherche de la volatilité limite d'un carburant

Cette méthode consiste à pointer pour chacun des carburants à volatilité différente, chacun de ceux-ci étant représenté sur le diagramme par un point en fonction de sa richesse en produits légers et de sa tension de vapeur Reid, le nombre de calages au ralenti obtenu avec un canevas de marche bien déterminé et toujours le même; les températures extérieures et états hygrométriques étant notés. On peut aussi déterminer pour chaque voiture la limite,à zéro calage et pour les conditions atmosphériques les plus défavorables (température extérieure 0°C et humidité de 100%),de volatilité au-dessous de laquelle les calages disparaissent.

C'est ainsi par exemple (voir figure) que :

- Pour 0°C - 100 % humidité avec carburant n° 1 : 4 calages
- Pour 0°C - 100 % humidité avec carburant n° 2 : 1 calage
- Pour 0°C - 100 % humidité avec carburant n° 3 : 0 calage

la limite est entre 2 et 3 en A.

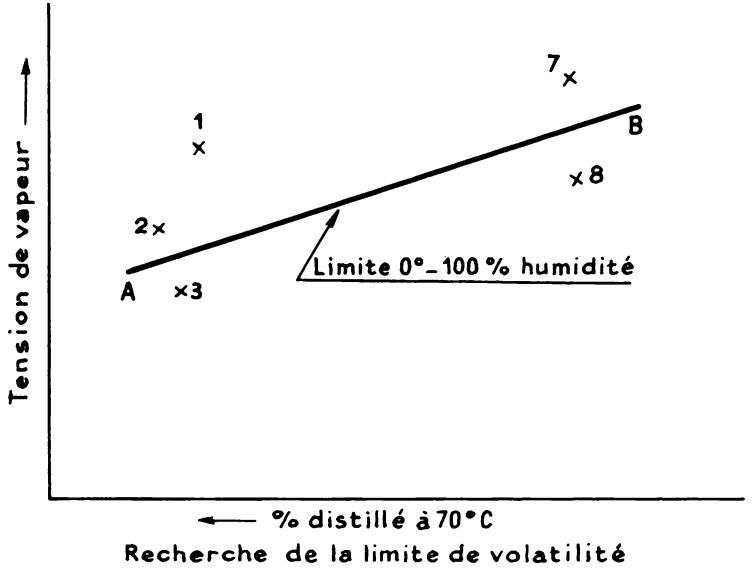
De même :

- Pour 0°C - 100 % humidité avec carburant n° 7 : 1 calage
- Pour 0°C - 100 % humidité avec carburant n° 8 : 0 calage

la limite est entre 7 et 8 au point B.

La droite AB constitue donc la limite de volatilité pour 0°C et 100 % d'humidité, c'est-à-dire pour le risque maximum.

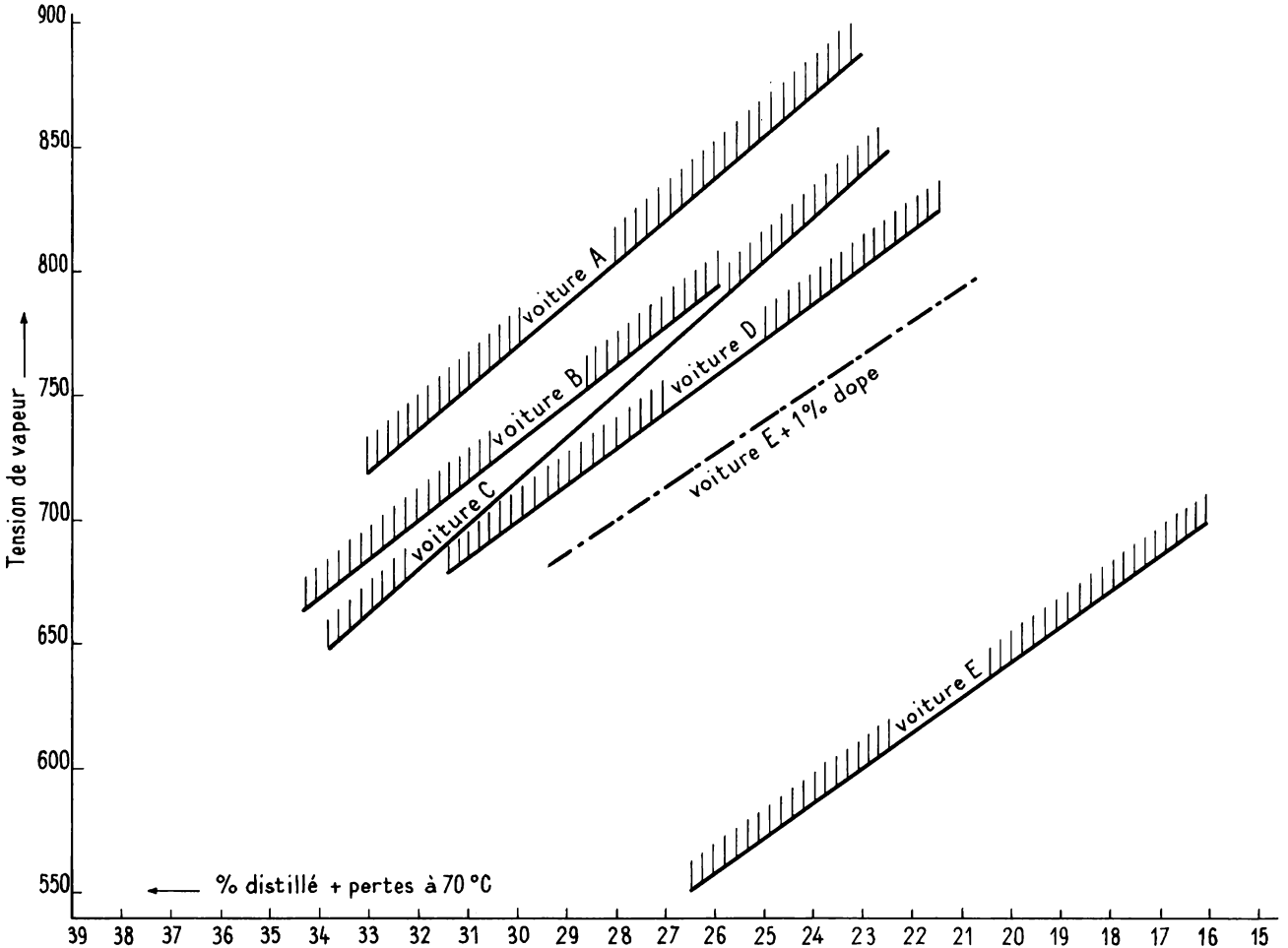
Cette droite est caractéristique d'un type de voiture déterminé.



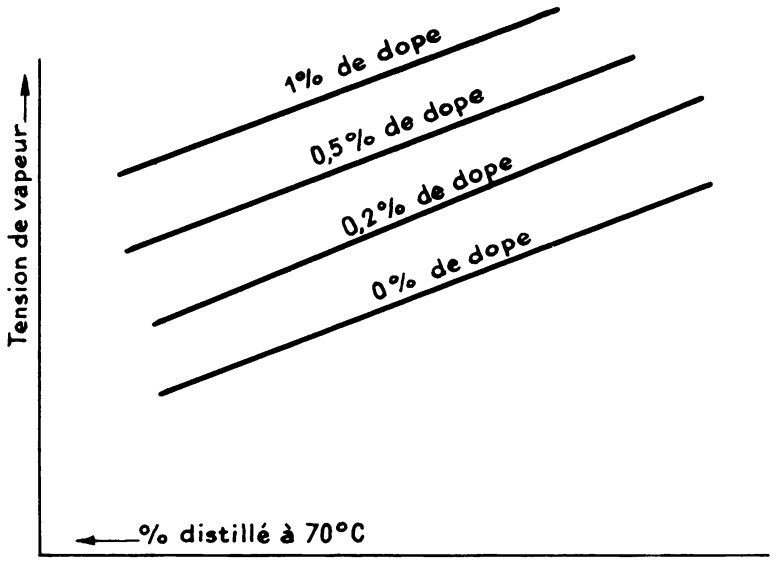

Recherche de la limite de volatilité

En réunissant sur un même diagramme les droites limites, caractéristiques de chaque voiture A, B, C, D, E, on peut se faire une idée du classement des différentes voitures du point de vue du givrage et des caractéristiques volatilité du carburant à adopter l'hiver pour un parc de voitures déterminées.

On peut ainsi par cette méthode déterminer l'efficacité d'un dope par le décalage des courbes caractéristiques vers le haut du diagramme.




Volatilité limite du carburant pour éviter le givrage sur quelques voitures françaises pour les conditions atmosphériques les plus défavorables (0°-100 % humidité)




Efficacité d'un dope

Remarque I :

La pente des droites caractéristiques est assez peu accentuée, ce qui indique que la richesse en légers influe plus que la tension de vapeur sur les incidents de givrage.

Remarque II :

Certaines voitures comme la voiture E du diagramme sont beaucoup plus sensibles que d'autres au givrage.

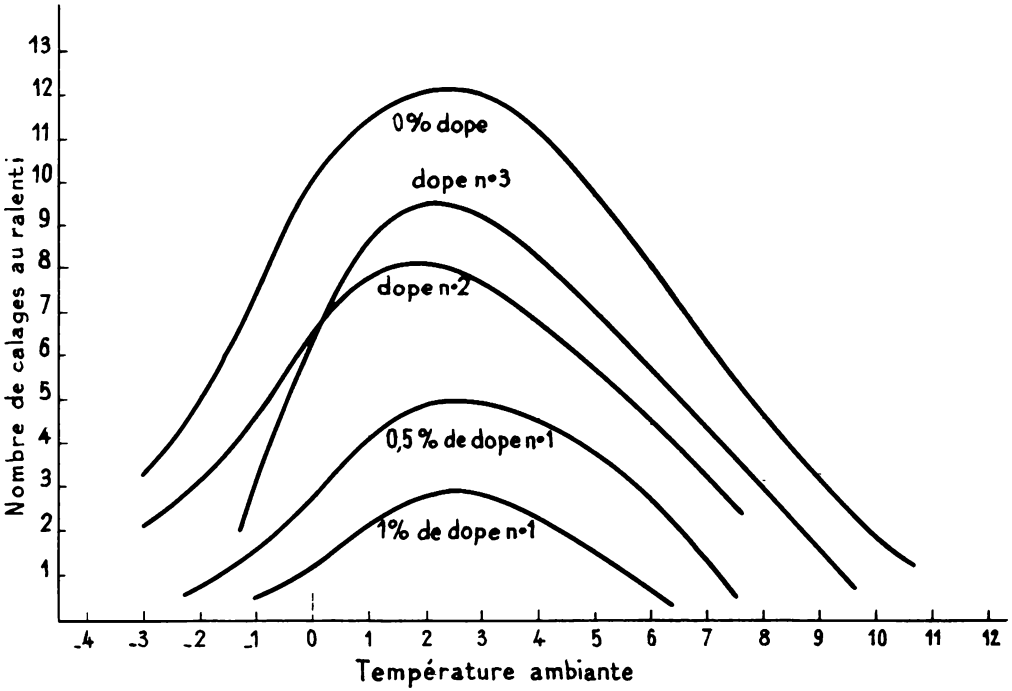
On peut espérer que les progrès des constructeurs dans les années à venir concernant la ventilation et le réchauffage sous capot feront relever les caractéristiques d'une manière telle que les dopes de carburant seront inutiles.

b) Méthode d'essais pour évaluer l'efficacité d'un dope antigivre

Quand il s'agit seulement d'évaluer l'efficacité de différents dopes à mélanger à un carburant d'hiver déterminé, on peut utiliser la méthode suivante qui consiste à tracer, pour la voiture reconnue la plus sensible au givrage pour un canevas de marche déterminé à l'avance et pour l'hygrométrie maxima 100 %, la courbe donnant le nombre de calages en fonction de la température ambiante.

On peut, par l'examen de ces courbes, classer les différents dopes par efficacité et déterminer la proportion à utiliser pour couvrir un risque donné. On peut aussi déterminer, par l'examen des

courbes, l'efficacité dans une certaine zone de température et faire des mélanges de dopes agissant dans des limites différentes.




Étude de dopes sur voiture sensible au givrage pour 100 % humidité

Le diagramme permet en outre de déterminer le pourcentage de dope à adopter dans une région de distribution de conditions climatiques moyennes connues, ce qui peut conduire à des économies importantes pour le raffineur.

Autre méthode. - Une autre méthode d'étude de dopes antigivre consiste à observer la température du papillon des gaz par un couple enregistreur au moment de la tenue du ralenti. Cette température est d'autant plus basse que le dope est efficace.

Remarque sur l'efficacité d'un dope antigivre :

Il est à remarquer que beaucoup de dopes susceptibles d'être utilisés comme antigivre sont partiellement solubles dans l'eau. Le circuit de distribution d'un carburant à partir de la raffinerie (pipeline, wagons, camion-citerne, pompes, etc.) contenant toujours un peu d'eau, il y a lieu d'en tenir compte en augmentant la dose au départ de la raffinerie. Cette perte en dopes peut atteindre 10 à 20 %.

Remarque sur l'évolution dans le temps des incidents de givrage :

On peut penser que les incidents de givrage sur moteurs d'automobiles vont, dans les années à venir, disparaître complètement et que les dopes antigivre deviendront inutiles. Ceci d'abord par les progrès réalisés par les constructeurs (certaines marques de voitures n'ont absolument pas d'incidents) et aussi par la diminution progressive envisagée de la volatilité des carburants dans les années à venir par suite de nouveaux traitements en raffineries imposés par l'augmentation continue des indices d'octane.

## Limites supérieures de volatilité pour la période d'été

### Tampon de vapeur - percolation

Les incidents de "tampon de vapeur", qui avaient disparu à peu près totalement depuis une vingtaine d'années, se sont de nouveau révélés en même temps que l'augmentation générale de la volatilité des carburants.

### Tampon de vapeur

Cet incident consiste en la réduction de puissance, ratés d'allumage et même arrêt complet du moteur par défaut d'alimentation après une longue course ou la montée d'une côte particulièrement pénible par une chaude journée d'été. C'est en côte et en montagne que se manifeste le plus souvent cet incident, l'altitude et la réduction de ventilation à faible vitesse étant deux facteurs favorables à la formation de "tampon de vapeur".

Causes des incidents de "tampon de vapeur" et remèdes. - Il est dû à la formation de bulles de gaz au sein du carburant contenu dans le système d'alimentation du carburateur. La formation d'une grande quantité de bulles très fines semble bien commencer dans le réservoir même de la voiture. Des enregistrements de température dans l'essence du réservoir au cours d'essais au mont Ventoux, en 1954, on fait apparaître une hausse de température de 30 °C (ambiance au départ) à 41 °C au km 17, alors que l'ambiance à ce moment n'était plus que de 15 °C.

Ce réchauffage de l'essence du réservoir est dû en partie au "léchage" du réservoir par une veine d'air chaud provenant de la ventilation sous capot et aussi à la réverbération de la route chauffée par le soleil (le tampon de vapeur est favorisé par une route blanche).

La formation de ces bulles de vapeur et leur agglomération se poursuit dans toute la tuyauterie jusqu'au carburateur en passant par la pompe d'alimentation.

Les températures relevées dans les essais du mont Ventoux sont voisines de 60°C autour de la pompe d'alimentation (55°C dans le liquide même de la pompe) pour atteindre 70°C au voisinage du carburateur. C'est dans la pompe même que le phénomène de vaporisation est le plus gênant, provoquant le désamorçage de celle-ci quand la quantité de vapeur dépasse une certaine limite. C'est alors l'arrêt du moteur par défaut d'alimentation.

Les incidents se produisent lorsque la proportion vapeur-liquide à l'aspiration de la pompe atteint une certaine valeur. L'augmentation du débit de la pompe qui recycle une partie du carburant a pour effet de diminuer et même de faire disparaître le vapor lock. Ce fait a été confirmé en 1956 où le simple fait d'adapter une pompe de débit plus grand sur une voiture, jugée auparavant très sensible au tampon de vapeur, le fait disparaître complètement.

En pratique, le risque de tampon de vapeur est presque nul quand le débit de la pompe atteint quatre fois la quantité d'essence demandée par le carburateur.

En fait, le constructeur de voiture peut faire beaucoup pour réduire ce genre d'incident par une bonne ventilation de la pompe d'alimentation en évitant le passage des conduits dans des parties trop chaudes, par le choix d'une pompe largement dimensionnée, etc. Certaines voitures bien étudiées ne sont absolument pas sensibles au vapor lock et ceci même avec des carburants de haute volatilité.

Limites supérieures de volatilité des carburants pour éviter le tampon de vapeur. - Indépendamment des dispositions mécaniques et de ventilation du moteur, l'augmentation de la volatilité du carburant favorise le tampon de vapeur. Le raffineur se doit donc de connaître les limites acceptables de volatilité de son carburant en fonction du parc actuel de voitures. Ces limites ne sont pas immuables et doivent être révisées tous les quatre ou cinq ans pour tenir compte des progrès réalisés par les constructeurs.

Méthode d'essais - Ventoux 1955. - On alimente chacune des dix voitures les plus représentatives du parc français, successivement avec une vingtaine de carburants à volatilités différentes, chacun de ces carburants étant représenté sur le diagramme (voir figure p. 40) par un point en fonction de sa tension de vapeur Reid et sa richesse en produits légers (pourcentage distillé à 70°C).

Autour de chaque point central représentant le carburant nous avons tracé une couronne de 10 points figurant, toujours dans le même ordre, chacune des voitures essayées. Chacune des voitures montait en charge le Ventoux à une vitesse correspondant à ses moyens sans rechercher la performance.

Trois cas peuvent se présenter :

a) La voiture monte normalement sans signe de faiblesse (sur le diagramme cercle blanc);

b) La voiture monte péniblement avec baisse de puissance, quelques ratés, mais néanmoins arrive au sommet : montée limite (sur le diagramme cercle avec croix);

c) La voiture à la panne caractérisée de tampon de vapeur et la montée est impossible (sur le diagramme cercles noirs).

Nous avons obtenu ainsi un ensemble d'environ 200 points et la répartition dans le plan des cercles noirs, blancs et croix nous a permis de déterminer la limite que nous cherchions. Cette limite confirmée en 1955 et 1956 est donnée sur le diagramme, elle répond à la formule :

$$\% \text{ distillé à } 70^{\circ}\text{C} + \text{pertes} < 31,3 + 0,05\, T_v - 0,000105\, (T_v)^2$$

ou plus simplement en assimilant la courbe à une droite pour les carburants normaux :

$$T_v \leqslant 920 - 14\ (\% \text{ à } 70^{\circ}\text{C} + \text{pertes})$$

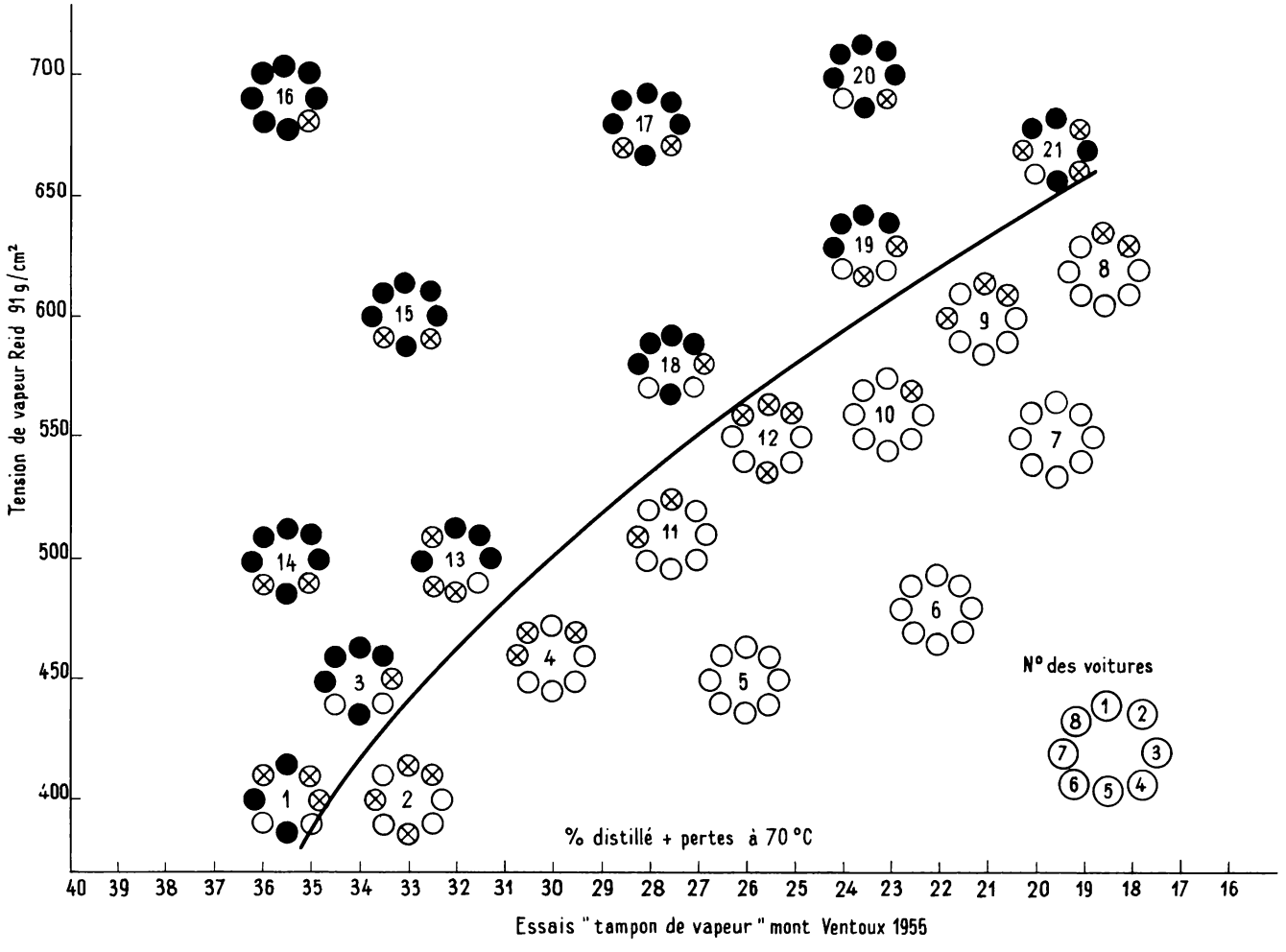
où $T_v$ est la tension de vapeur Reid du carburant exprimé en grammes par centimètre carré.

Nous donnons ci-dessous, à titre documentaire, une formule longtemps utilisée aux Etats-Unis.

$$71,1\, T_v\ (\% \text{ distillé à } 70^{\circ}\text{C} + \text{pertes}) < 65 \text{ pour les mois très chauds}$$

$$\text{et } 71,1\ (T_v) + (\% \text{ distillé à } 70^{\circ}\text{C} + \text{pertes}) < 85 \text{ pour les mois très froids (risque de givrage)}$$

où $T_v$ est la tension Reid exprimée en kilogrammes par centimètre carré.


Tension de vapeur Reid 91 g/cm²
700
650
600
550
500
450
400
40 39 38 37 36 35 34 33 32 31 30 29 28 27 26 25 24 23 22 21 20 19 18 17 16
% distillé + pertes à 70 °C
Essais "tampon de vapeur" mont Ventoux 1955
N° des voitures
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21

La méthode que nous venons de mentionner, page 37, pour déterminer les limites de volatilité est essentiellement pratique; le but recherché n'est que de donner aux raffineries des indications sur les limites à ne pas dépasser pour couvrir les risques de "tampon de vapeur" à une époque donnée, ces limites étant susceptibles d'être modifiées en fonction de la sortie de nouveaux modèles de voitures. Nous devons mentionner une autre méthode de classement des carburants au point de vue du tampon de vapeur ayant fait l'objet de recherches en Angleterre, en Suisse et reprise en France par une grande société de pétrole et l'Institut Français du Pétrole. Cette méthode est dite de détermination du rapport vapeur/liquide caractéristique d'un carburant pour une température donnée.

Méthode de détermination vapeur/liquide. - Nous avons vu, page 37, que le désamorçage de la pompe d'alimentation en carburant s'effectuait à partir du moment où le volume de gaz formé devenait trop important. Il était donc naturel de tracer en laboratoire pour chaque carburant la courbe du rapport vapeur/liquide en fonction de la température; ces courbes ont l'allure de la figure "Méthode vapeur/liquide".

Cette méthode donne un classement absolu des carburants satisfaisant pour un vapeur/liquide déterminé (par exemple 16), mais les essais route sur différentes voitures sont malgré tout indispensables pour déterminer la limite à ne pas dépasser. Par exemple, sur la figure, les carburants, ayant un vapeur/liquide de 16 à une température supérieure à 64°C, ne donneront pas lieu à des incidents.

L'inconvénient de cette méthode réside en l'utilisation du rapport vapeur/liquide long à déterminer et nécessitant un appareillage assez compliqué, alors que les paramètres tension de vapeur et distillation sont des mesures courantes et que, de plus, cette méthode ne dispense pas des essais sur route pour détermination de la limite.

Méthode de Bridgman. - Bridgman caractérise la volatilité des carburants par leur tension de vapeur Reid et la pente de la tangente à la courbe de distillation A.S.T.M. au point 10 %.

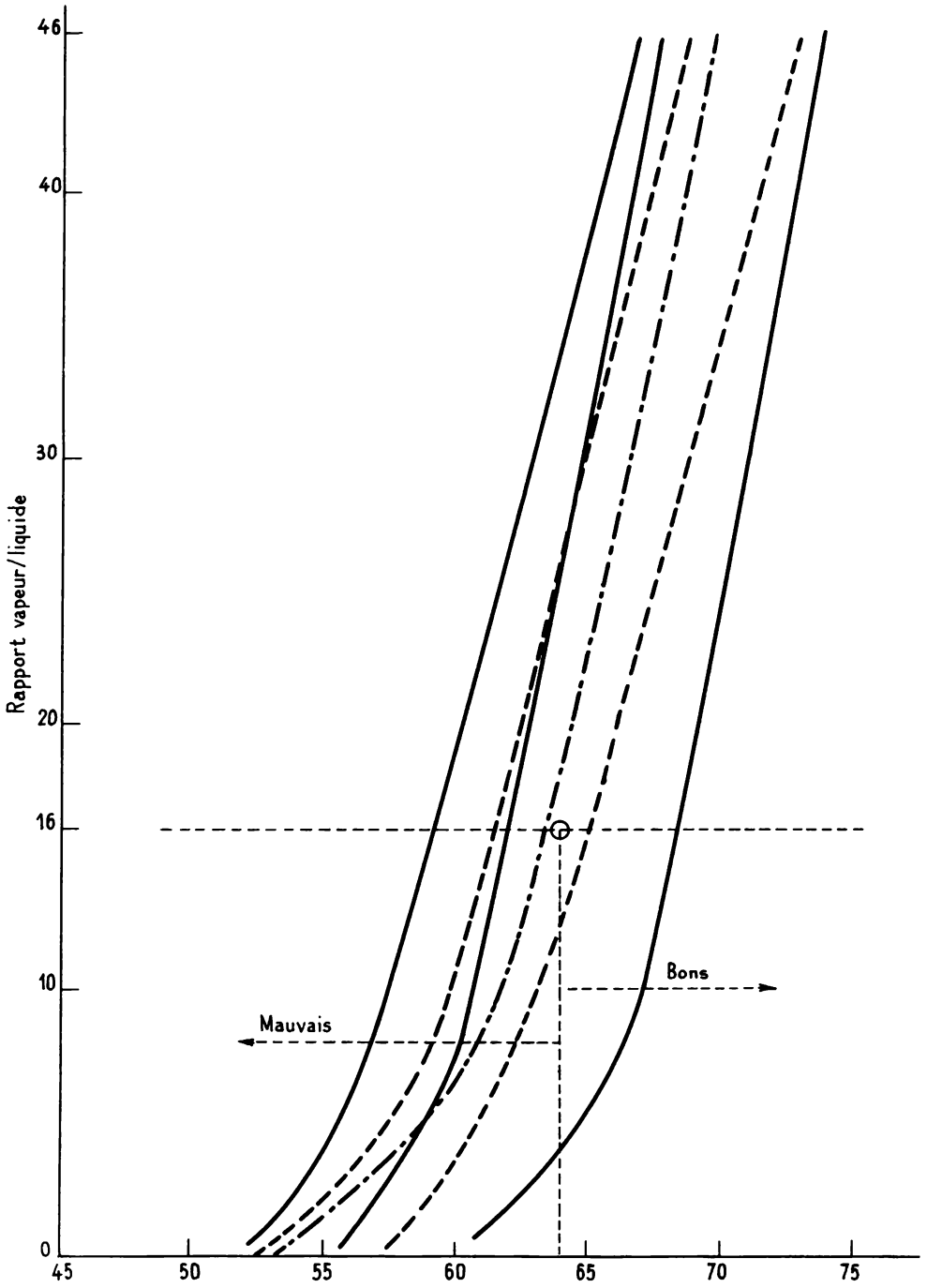
Il résulte d'essais effectués aux U.S.A. que :

$$T_v - \text{pente} = \text{constante} = R$$

$T_v$ étant la tension Reid en psi.

pente en degrés fahrenheit/pour-cent.

Cette méthode concorde relativement bien avec les résultats du mont Ventoux 1955. La valeur de R pour les conditions françaises serait de 5,6.




Méthode vapeur/liquide - Pression 760 mm

Méthode 20-10. - Mentionnons enfin une autre méthode qui caractérise la volatilité par la tension Reid et la différence en degrés des points 20 % et 10 % de distillation.

Des travaux américains récents sur cette question de formation du tampon de vapeur en automobile sont arrivés aux conclusions suivantes :

Pour un carburant donné, ayant une tension de vapeur déterminée, les températures ambiantes où il y a risque de formation de tampon de vapeur restent dans la limite d'une dizaine de degrés centigrades pour toutes les voitures (il s'agit de voitures américaines et ce résultat n'est pas facilement transposable sur les voitures françaises).

Une formule empirique indiquant la température ambiante pour laquelle il y a risque de tampon de vapeur a même été donnée :

$$t = 235 - 140 \log \text{tension Reid} - \frac{240}{\text{temp. dist. } 20\,\% - \text{temp. dist. } 10\,\%}$$

La caractéristique tension de vapeur n'est donc pas seule en cause, mais aussi la différence entre les points de distillation 20 et 10 % qui caractérisent en quelque sorte l'inclinaison de la courbe de distillation après le premier changement de courbure. On a donc intérêt non seulement à avoir une tension de vapeur basse (malgré tout compatible avec de bons départs à froid), mais aussi à avoir l'inclinaison de la courbe de distillation dans sa partie moyenne-légère.

Le fait ci-dessus explique pourquoi les mélanges essence-alcool, introduisant un palier dans la courbe de distillation, produisent plus facilement le tampon de vapeur que l'essence pure, malgré que la tension de l'alcool soit nettement inférieure à celle de l'essence.

Pertes de volatilité entre la raffinerie et l'utilisateur. - Toutes les méthodes indiquées précédemment et qui caractérisent la volatilité de façons différentes tendent à déterminer une limite supérieure. Il est à remarquer que cette limite s'applique à un carburant au moment du remplissage du réservoir de la voiture.

La limite admissible à la sortie de la raffinerie doit être relevée des pertes moyennes d'été (stockage, pompage, transport, etc.) entre raffinerie et pompes.

On peut estimer que pendant la saison chaude la perte en tension de vapeur, entre la raffinerie et le réservoir de l'utilisation, est de

30 à 50 g pour un carburant de 550 g de tension. Le point initial de distillation se trouve relevé de 3 à 4°C environ.

Percolation

La percolation est cet incident extrêmement désagréable qui se traduit par l'impossibilité de repartir lorsqu'on a stoppé quelques instants un moteur, celui-ci étant chaud : elle est due, les températures sous capot augmentant après l'arrêt, à la vaporisation de l'essence contenue dans la cuve du carburateur. Celui-ci se vide en partie et les vapeurs d'essence se répandent dans tout le système d'admission (filtre, tubulure). Il s'ensuit qu'au moment d'un nouveau départ, le mélange est beaucoup trop riche et n'allume pas tant que le moteur n'a pas évacué l'excès de vapeur d'essence.

Les incidents de percolation (pannes par mélanges riches) doivent être étudiés indépendamment des incidents de tampon de vapeur (pannes par mélanges pauvres) c'est la raison pour laquelle les essais de tampon de vapeur au Ventoux ne comportaient pas d'arrêt en côte.

En fait, les incidents de percolation dépendent très peu de la volatilité des carburants, mais presque uniquement des dispositions du carburateur. Celles-ci doivent être telles qu'elles empêchent les vapeurs d'essence se dégageant de la cuve de se répandre dans le système d'admission.

Nous avons signalé pour mémoire cette sorte d'incident qui est maintenant en voie de disparition.

## Influence des produits légers sur les mises en action après départ à froid

Le moteur une fois démarré le matin à froid, la "mise en action" peut être caractérisée par le temps qui s'écoule entre le départ et l'instant où le moteur commence à "tourner rond" et où l'on peut accélérer à fond sans provoquer de calage, de ratés d'allumage, de "pétarades" et retour au carburateur le starter étant retiré. Cette période de mise en action assez pénible pour le conducteur et la voiture peut varier de quelques secondes à plusieurs minutes selon la volatilité du carburant et, en particulier, de sa richesse en produits légers.

Le fait que le moteur ne "tourne pas rond" est dû à l'admission d'une forte proportion d'hydrocarbures à l'état liquide, provoquant des inégalités marquées de répartition entre les différents cylindres, et

à la combustion de mélanges trop pauvres à faible vitesse de combustion provoquant "pétarades" et "retours" au carburateur.

En fait, les mises en action après départ à froid seront d'autant plus rapides que le carburant sera riche en produits légers.

Remarque I :

Le recyclage dans les carburants d'une certaine proportion de butane diminue considérablement le temps de mise en action et permet de réduire notablement le temps d'utilisation du starter ce qui, nous le verrons plus loin, réduit considérablement l'usure des chemises du moteur.

Remarque II :

Les mises en action après départ à froid deviennent pénibles quand la différence en degrés des points de distillation 20 % et 10 % tombe au-dessous d'une certaine valeur.

Le cas des carburants alcoolisés dont la distillation présente un palier et dont les mises en action sont difficiles est une illustration de cette remarque.

En règle générale tout palier dans la courbe de distillation par mélange d'un certain pourcentage de produit pur (hydrocarbure, alcool ou autres...) amène des perturbations de carburation en créant une discontinuité dans les phénomènes d'entraînements mécaniques des hydrocarbures les uns par les autres pendant la vaporisation du mélange.

## Conclusion générale sur la richesse en produits légers d'un carburant

Quelle que soit la manière dont on caractérise les produits légers on peut tirer les conclusions générales suivantes :

L'augmentation des légers est favorable à tout ce qui se passe à froid dans un moteur, soit :

- Départ à froid
- Mise en action

Néanmoins, il y a dans leur augmentation une limite supérieure d'hiver déterminée par le givrage (cette limite peut être reculée par l'utilisation de dope antigivre) et une limite supérieure d'été déterminée par le tampon de vapeur.

## INFLUENCE DE LA VOLATILITE MOYENNE D'ENSEMBLE DU CARBURANT POINT 50 %

Le niveau de température du point 50 % distillé donne, pour des carburants normaux, une idée de la volatilité d'ensemble d'un carburant. C'est ainsi qu'un carburant distillant 50 % à 85°C a une volatilité d'ensemble plus grande qu'un autre dont le point 50 % est à 110°C.

Il ressort de travaux effectués aux Etats-Unis, en Angleterre et aussi en France qu'il existe une relation entre le point 50 % de distillation et les qualités de reprises et d'accélération de la voiture en marche normale à chaud.

Indiquons immédiatement que le choix de ce point n'a rien d'absolu et il est certain que les conceptions différentes, par exemple des voitures françaises et américaines quant au dimensionnement et au réchauffage des tubulures d'admission, doivent faire varier ce point. Nous pensons, pour notre part, que le point 45 % serait plus indiqué pour les moteurs français dont les tubulures d'admission sont plus refroidies que celles des voitures américaines.

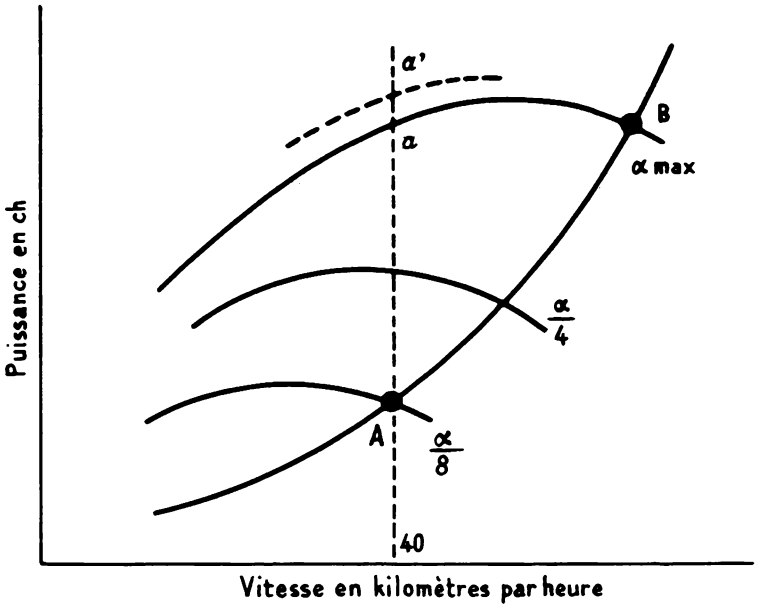
En fait, peu importe que l'on adopte le point 40-45 ou 50 pour représenter les qualités de reprise à chaud puisque les classements de carburants normaux avec chacun de ces points restent les mêmes.

### Processus de la reprise en marche normale

Considérons la courbe d'utilisation d'une voiture (voir fig. p. 47) donnant la puissance absorbée en fonction de la vitesse en kilomètres par heure (ou, ce qui revient au même, du régime du moteur pour une démultiplication donnée) en prise directe sur une route plate, sans vent. Nous pouvons sur ce même diagramme disposer la courbe de puissance du moteur qui entraîne la voiture.

Supposons la voiture roulant à vitesse réduite de 40 km correspondant au point de fonctionnement A relatif à une ouverture du papillon des gaz de $\alpha/8$. Brusquement le conducteur, pour doubler une voiture, accélère à fond, le point de fonctionnement passe progressivement de A en B.

Le "brillant" de la reprise sensible au conducteur sera donnée par la puissance instantanée, immédiatement disponible, c'est-à-dire par la différence des ordonnées Aa, ceci pour une essence déterminée ayant par exemple un point 50 % à 110°C. Si nous utilisons une essence plus volatile, ayant par exemple un point 50 % à 90°C nous disposerons d'une puissance instantanée non plus de Aa, mais de Aa' supérieure à Aa et ceci pour la même ouverture maxima.




Ce fait mérite explications :

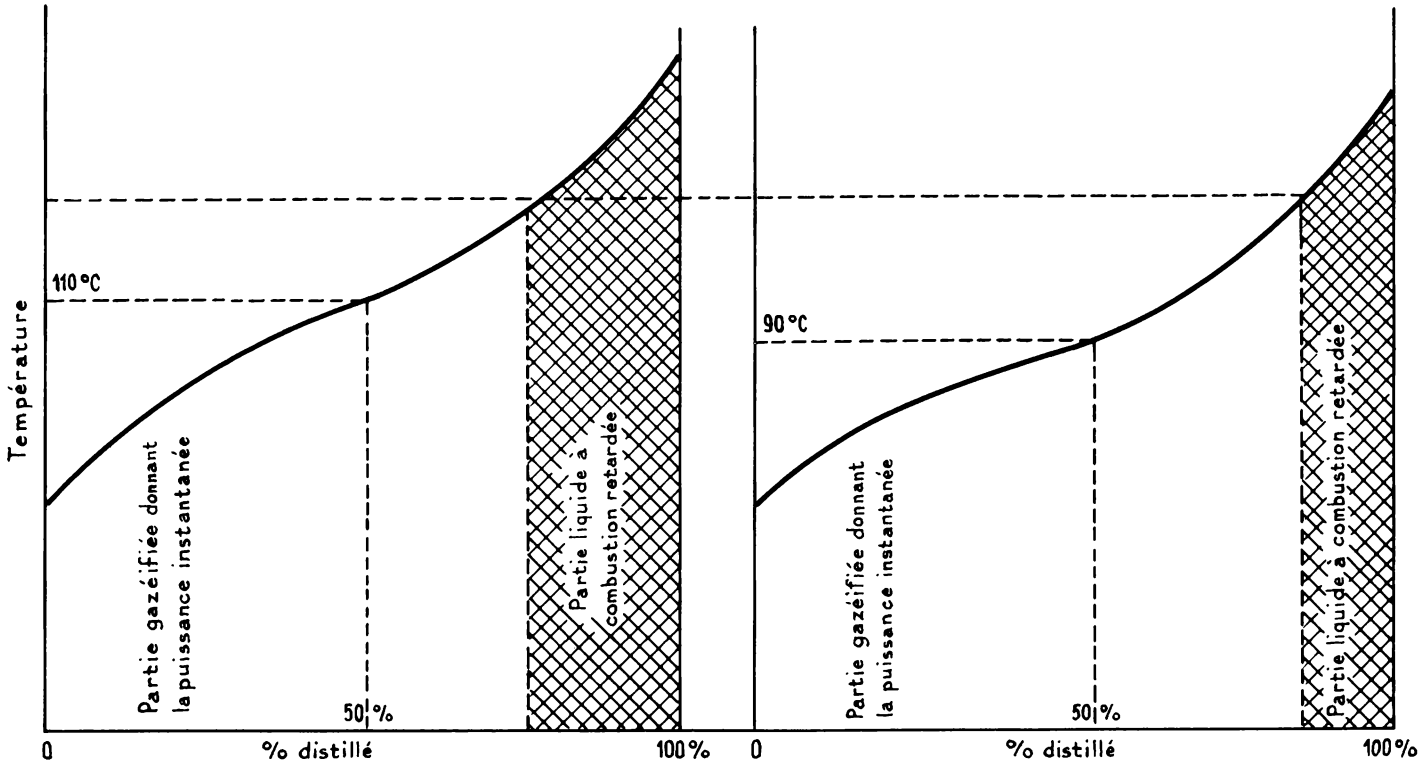
A l'instant de la reprise avec l'essence peu volatile (point 50 % = 110°C), la puissance instantanée dépend essentiellement de la partie vaporisée du carburant, la partie liquide libérant ses calories avec un certain retard (une goutte d'essence liquide ne brûle pas instantanément), la puissance instantanée sera proportionnelle à la surface représentée sur le diagramme ci-après).

La partie liquide de la charge sera relativement abondante, la puissance instantanée relativement faible.

Au moment de la reprise avec une essence très volatile (point 50 % à 90°C), la partie liquide sera relativement faible et la puissance instantanée relativement grande.

Nous n'avons parlé ci-dessus que de puissance instantanée, la seule sensible au conducteur, correspondant à un régime thermique instable. Il est évident qu'en régime thermique stable, par exemple au banc, les deux essences donneront la même puissance.

Remarquons qu'au moment de l'accélération la pompe de reprise du carburateur injecte une quantité notable d'essence liquide comprise entre 0,4 et 1 $cm^3$ selon les cylindrées.




Influence du point 50 % sur la puissance instantanée à la reprise

Influence de la volatilité d'ensemble d'un carburant (point 50 %) sur les accélérations en marche normale. Méthodes d'essais

On peut mettre en évidence l'influence du point 50 % sur les accélérations de deux manières :

a) Essais statistiques : En disposant par exemple de cent voitures que l'on alimentera sans que les conducteurs le sachent avec des carburants ayant des points 50 % nettement différents, par exemple 80°C, 100°C, 120°C. Chaque conducteur reçoit un questionnaire où sont consignées ses impressions au point de vue du "brillant" de la reprise. Le dépouillement démontre formellement l'influence du point 50 % sur la qualité de la reprise et, de plus, que les conducteurs sont capables de déceler une différence de 5° du point 50 %.

b) Essais route : Disposant d'un certain nombre de voitures représentatives, on les alimente successivement avec des carburants ayant des points 50 % différents (80°C, 100°C, 120°C).

L'essai sur chaque voiture consiste à rouler sur route plate, sans vent, à vitesse réduite (40 km par heure) pendant assez longtemps pour que le régime thermique de la voiture soit complètement stabilisé. Au bout d'une demi-heure on procède à une accélération dont on prend le temps soit au chronomètre, soit par enregistrement. Puis on passe sur le carburant suivant et on répète l'essai en ayant soin d'attendre une demi-heure de régime constant avant chaque mesure d'accélération.

## INFLUENCE DE LA RICHESSE D'UN CARBURANT EN HYDROCARBURES LOURDS A POINTS D'EBULLITION ELEVES. POINT 90 % OU POINT FINAL

### a) Influence sur la consommation

La consommation d'une voiture dépend non seulement du pouvoir calorifique du carburant comme nous le verrons plus loin, mais aussi du degré de transformation en travail de ces calories. Ce sont en effet les hydrocarbures lourds de la queue de distillation qui constituent la partie de la charge brûlée à l'état liquide et dont les calories sont mal utilisées (libérées plus tard dans le cycle).

A performance équivalente on peut enregistrer, entre une essence à point final 180 et une autre à point final 200, une différence notable de consommation en faveur de la première.

Cette différence sera d'autant plus marquée que la saison sera

plus froide, que la tubulure d'admission sera moins réchauffée et que la charge sera réduite (service de ville).

Des essais effectués l'hiver sur différentes voitures ont fait ressortir un gain de 10 % en faveur de l'essence coupée à 180°C. L'été, par contre, ce gain pourra s'amenuiser jusqu'à devenir nul sur des voitures à admission réchauffée.

b) Influence sur l'encrassement du moteur. Auto-allumage. Perte de puissance

Dépôts dans le système d'admission : tubulure. Chapelle d'admission

Ces dépôts, dont la formation sera étudiée plus loin à propos des gommes et impuretés diverses, sont aussi en relation très nette avec le point final de l'essence utilisée. De nombreux essais au banc et sur route confirment ce fait.

Dépôts dans la chambre de combustion

Ces dépôts sont d'origines diverses :

1. Combustion incomplète du carburant (suie généralement sèche);
2. Carbonisation de l'huile de graissage;
3. Résidus de combustion du plomb tétraéthyle contenus dans l'essence;
4. Résidus de combustion de dopes divers contenus dans l'essence, soit dopes d'inhibition, soit autres;
5. Résidus de combustion des impuretés de l'essence (gommes);
6. Soufre : celui-ci agit très peu sur la quantité de dépôts, mais a une action directe sur la texture physique de ces dépôts, notamment sur leur dureté pouvant entraver par là leur évacuation.

Le point final de distillation a une influence marquée sur les dépôts dus à la combustion incomplète du carburant. Ce fait s'explique parce que ce sont les hydrocarbures de "queue" qui constituent la partie brûlant à l'état liquide.

La combustion d'une bulle liquide d'essence se fait par sa partie extérieure, là où il y a contact intime avec les molécules d'oxygène, la partie centrale de la bulle s'échauffe par conductibilité ou rayonnement, elle craque avec formation de carbone dont la plus grande partie est évacuée par l'échappement, mais dont tout de même une partie reste dans la chambre de combustion. La formation de ces dépôts est d'autant plus accentuée que le point final de l'essence est élevé.

La formation de ces dépôts est plus abondante à charge réduite en régime de ville. L'amélioration de la combustion consécutive à l'utilisation de mélanges carburés plus pauvres les réduit notablement.

Nous verrons plus loin que ces dépôts, outre qu'ils réduisent le volume de la chambre de combustion, sont générateurs d'auto-allumage, de pré-allumage et qu'ils provoquent souvent une perte de puissance des moteurs.

### c) Dilution de l'huile de graissage

L'action de dilution de l'huile de graissage par les produits de queue de distillation les plus difficilement vaporisables se produit surtout lors des départs à froid et se prolonge tant que le moteur est froid. Il est évident que la limitation de la quantité de ces produits de queue diminue cette action de dilution et de ruissellement le long des parois du cylindre jusque dans le carter. Cette dilution a pour principal inconvénient la diminution du pouvoir lubrifiant des huiles, facteur d'augmentation de l'usure et accélérateur d'oxydation de l'huile du carter.

Certains moteurs agricoles fonctionnant avec des carburants lourds (pétrole) "fabriquent" même de l'huile de graissage au lieu d'en consommer comme il se devrait et leurs constructeurs sont obligés de prévoir un robinet de trop-plein pour éviter que le niveau dans le carter ne monte trop haut.

Le facteur d'usure de ce genre de tracteur est considérable.

### d) Répartition de la charge entre les différents cylindres

Dans un moteur à quatre cylindres, tournant à 3 000 tours, on impose à la veine carburée circulant à une vitesse moyenne de l'ordre de 70 m/s, 100 changements de direction par seconde, dont un sur deux de ces changements constitue un renversement complet de sens (ordre d'alimentation des cylindres : 1, 3, 4, 2).

On conçoit que si l'air et le gaz d'essence suivent assez docilement, l'essence à l'état liquide y met moins de bonne volonté.

La bonne répartition du liquide en suspension et de celui en ruissellement le long des parois de la tubulure - et ceci à toutes les charges et allures - est un problème délicat qui n'est d'ailleurs pas résolu.

On ne fait que de l'à peu près comme en témoignent les différences observées dans les analyses de gaz d'échappement par cylindres séparés.

Il est évident que la réduction des queues de distillation, en diminuant la proportion de liquide, ne peut que favoriser la répartition entre les cylindres.

Nous avons déjà vu à propos de la caractéristique "densité" que les inégalités de répartition de la charge entre cylindres entraînaient des irrégularités du couple moteur, génératrices de vibrations et de bruits par résonance avec les tôles de carrosserie de voiture ou de cellule d'avions.

e) Répartition entre les cylindres de la valeur antidétonante du carburant

Deux cas sont à envisager :

1. Cas d'essences pures

Les irrégularités de distribution de la partie liquide constituée par les fractions de queue entraînent des différences dans les valeurs antidétonantes des charges des différents cylindres. En général, l'abaissement du point final de l'essence améliore l'indice d'octane (ce n'est toutefois pas une loi générale).

Certains cylindres, alimentés avec une proportion élevée de liquide, pourraient donc détoner avant les autres. L'abaissement du point 90 % ou du point final atténue ce défaut.

2. Cas d'essences éthylées

Le défaut signalé ci-dessus est encore accentué dans le cas d'utilisation d'essences éthylées. Le plomb tétraéthyle est incorporé à l'essence sous forme d'Ethyl fluid. Ce dernier est un mélange de plomb tétraéthyle et des halogènes nécessaires à la transformation de l'oxyde de plomb formé pendant la combustion en dibromure et dichlorure d'éthylène.

Le plomb tétraéthyle est un liquide qui bout aux environs de 200°C. Il aura donc tendance à se rassembler dans la partie liquide, d'où des différences dans les valeurs antidétonantes réelles des charges des cylindres.

Une autre conséquence fâcheuse est que les halogènes ont des points d'ébullition qui diffèrent notablement de celui du plomb. Il s'ensuit que si, à l'origine, les proportions des différents composants de l'Ethyl fluid sont correctes pour obtenir une réaction complète dans la transformation de l'oxyde, elles ne le sont plus dans les cylindres mêmes. Les cylindres, alimentés en majorité avec du gaz, auront trop d'halogènes par rapport au plomb et, non seulement les valeurs antidétonantes seront différentes, mais certains cylindres fabriqueront des dépôts de plomb plus rapidement que d'autres.

La réduction du point final, diminuant la partie liquide, atténue ces défauts.

f) Action sur l'usure du moteur

Le processus d'usure d'un moteur est quelque chose de très complexe. Ses causes sont, soit d'ordre mécanique (abrasion, érosion, poussières, etc.), soit d'ordre chimique (corrosion par acides et aldéhydes résultant de combustion incomplète).

L'usure d'ordre mécanique est relativement importante dans les moteurs de tracteurs agricoles qui fonctionnent normalement dans une atmosphère poussiéreuse. Elle est réduite dans les moteurs d'automobiles qui roulent normalement en ville ou sur routes asphaltées.

L'usure d'ordre chimique est maxima à froid et l'on peut avancer que la partie la plus importante de l'usure des moteurs provient des quelques premières minutes de fonctionnement à froid. Elle est plus forte en hiver où les mises en action sont plus laborieuses.

L'usage du starter tend encore à accélérer l'usure des moteurs.

Au moment d'un départ à froid, un flot d'essence liquide ruisselle le long des parois et enlève la pellicule d'huile qui subsistait d'un fonctionnement précédent, supprimant ainsi toute protection efficace du métal contre l'attaque par les aldéhydes et les acides qui vont se former en abondance pendant les quelques premières minutes de fonctionnement du moteur. Pendant ces premiers cycles, en effet, le mélange carburé est au total très riche (surtout avec starter); de plus, les parois froides ont une action de rupture dans la chaîne des réactions de combustion avec formation d'acides et d'aldéhydes (odeur piquante à l'échappement).

Il est évident que la réduction des produits de queue, en diminuant la portion de liquide et en réduisant la période de mise en action, entraîne une réduction de l'usure.

Tous les chercheurs sont d'ailleurs d'accord pour constater qu'il existe un lien étroit entre la qualité de la combustion et l'usure du moteur.

g) Action des queues de distillation sur la puissance massique du moteur

C'est le seul cas où l'adjonction de produits lourds dans une essence peut être bénéfique : lorsque, par exemple, on alimente un moteur tournant dans des conditions sévères de température et où l'on dispose d'un excédent de calories, on peut avoir intérêt dans certains cas à ce qu'une partie du mélange carburé reste à l'état liquide, ceci pour améliorer le remplissage et, par conséquent, la puissance maxima développée par le moteur (cas d'un moteur de course) il y a intérêt dans ce cas à allonger la queue de distillation et même à mélanger à l'essence des fractions plus lourdes comme le pétrole, à condition toutefois que l'indice d'octane du mélange reste suffisant.

VOLATILITE DES ESSENCES POUR L'AVIATION

Leurs courbes de distillation sont plus plates, elles ont moins de légers (début de distillation 50-55 au lieu de 38°C pour les essences auto) et aussi moins de lourds (point final 160-170 au lieu de 180-205 pour les essences auto). On dit qu'elles sont plus "homogènes" (coupe plus resserrée) et ceci pour les raisons suivantes :

a) Les légers peuvent être gênants en altitude (ébullition, pertes et formation de tampon de vapeur); ils sont moins nécessaires au sol que pour les essences auto, les avions disposant de moyens de démarrage beaucoup plus puissants. De plus, le régime des moteurs est beaucoup plus constant et les accélérations sont inutiles.

b) La limitation en hydrocarbures lourds a deux causes essentielles :

1. Obligation d'obtenir une bonne répartition entre les différents cylindres pour éviter les irrégularités du couple moteur générateur de vibrations et résonances, et aussi régularisation des valeurs antidétonantes réelles des charges des différents cylindres (les essences aviation ont le plus souvent deux à trois fois plus de plomb que les essences auto).
2. Obligation de réduire au minimum les dépôts dans la chambre de combustion d'un moteur d'aviation, ceux-ci, excellents

calorifuges, faisant obstacle à la transmission de chaleur vers les ailettes de refroidissement. On sait en effet que la puissance unitaire des cylindres de moteurs d'aviation à pistons est limitée par les difficultés d'évacuation de la chaleur vers l'extérieur. Un moteur d'aviation "meurt" le plus souvent parce qu'il a eu "trop chaud". Toutes causes d'augmentation de température peuvent lui être fatales.

Remarque concernant l'utilisation d'essence aviation dans une voiture automobile

Cette utilisation n'est pas à recommander : outre que les départs et mises en action à froid seront laborieux par suite du manque de légers, les accélérations seront mauvaises et les soupapes d'échappement risquent de "griller" à cause de la forte teneur en plomb de ces essences. Par contre, la consommation et les dépôts pourraient être réduits. L'indice d'octane sera le plus souvent pléthorique.

## CONCLUSIONS GENERALES SUR LA CARACTERISTIQUE VOLATILITE DES CARBURANTS

Cette caractéristique dont la détermination en laboratoire est des plus simples est, à notre avis, aussi importante que l'indice d'octane que nous étudierons plus loin. Si cette dernière est liée avant tout aux questions de rendement, la volatilité est essentiellement liée à la satisfaction et au confort du conducteur, ce confort se concrétise par des départs faciles, des mises en action rapides, des reprises franches, etc.; l'absence de givrage, de tampon de vapeur, un moteur propre, une usure réduite, etc. Le conducteur attache en effet une importance au moins aussi grande à l'ensemble de ces qualités qu'à l'absence de cliquetis.

### Caractéristiques légales de distillation

Ces caractéristiques légales administratives, destinées à protéger l'usager, et fixées par arrêtés de la Direction des carburants sont les suivantes :

Essence ordinaire (octobre 1957) :

Distillation (pertes comprises)

Avant 70°C ..... 10 %
Avant 140°C ..... 50 %

Avant 195°C ..... 95 %
Point final maximum ... 205°C
Résidus inférieurs à ... 2,5 %

Supercarburant :

Distillation (pertes comprises)

Avant 70°C ..... 10 %
Avant 140°C ..... 50 %
Avant 195°C ..... 95 %
Point final maximum ... 205°C
Résidus inférieurs à ... 3 %

Pétrole lampant :

Distillation (pertes comprises)

Avant 255°C ..... plus de 50 % en volume
Avant 285°C ..... plus de 80 % en volume

Essences aviation :

Pour les 4 essences aviation : 80 - 91/98 - 100/130 - 115/145

% distillé à 75°C { min 10 % / max 40 %

% distillé à 105°C min 50 %

% distillé à 135°C min 90 %

Somme des températures des points 10 et 50 % - minimum 135

Résidus max 1,5 %
Pertes max 1,5 %

Carburants pour turboréacteurs (voir chapitre spécial relatif à ces carburants)

Gas-oil moteurs :

Distillation

A 250°C ..... inférieur à 65 % pertes comprises
A 360°C ..... inférieur à 90 % pertes comprises

Fuel-oils :

Domestique à :
250°C..... inférieur à 65 %
Léger avant :
270°C..... maximum à 50 %
N° 1 avant :
270°C..... maximum à 50 %
N° 2 avant :
270°C..... maximum à 50 %

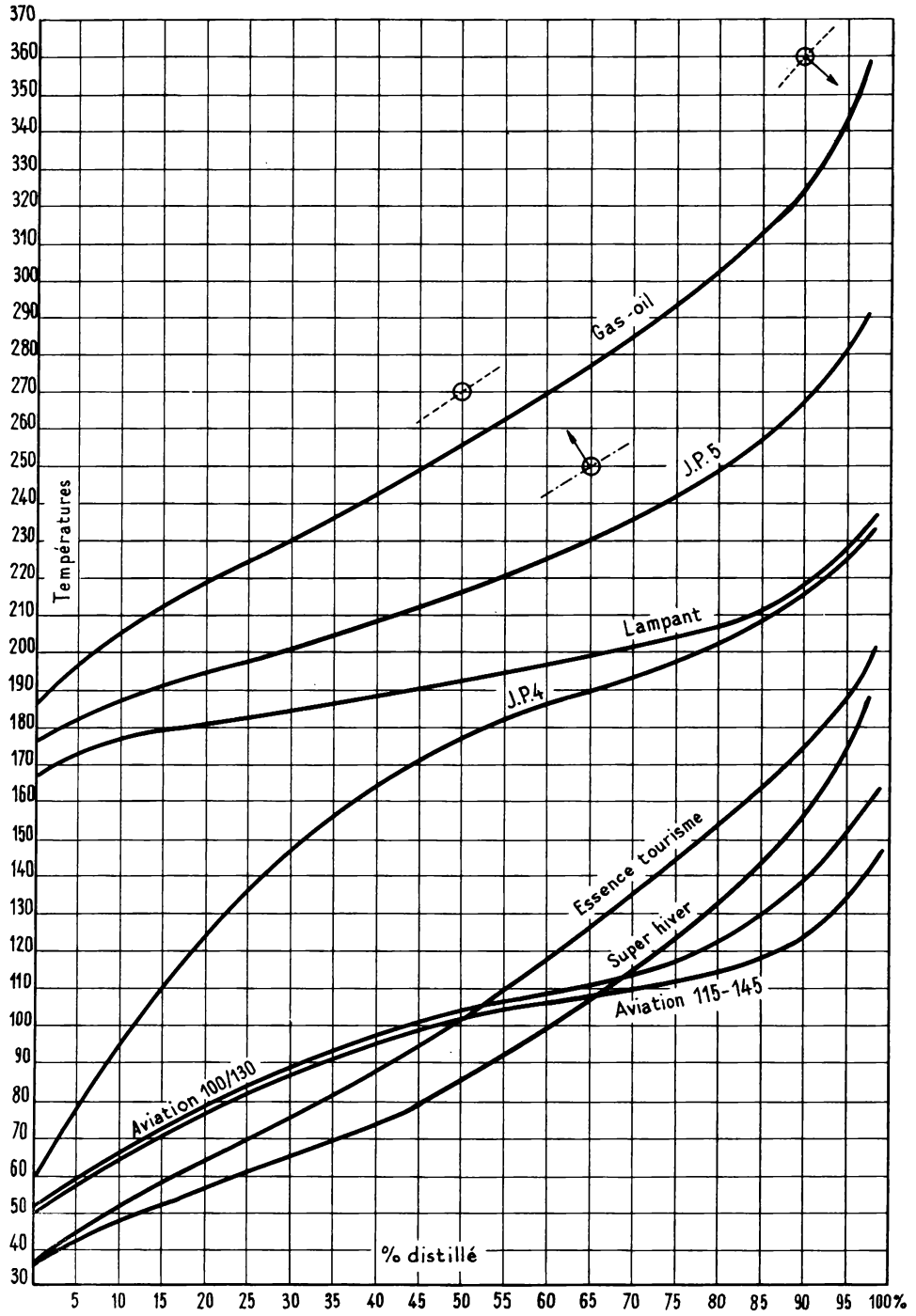
ESSENCES SPÉCIALES

Nous ne pouvons terminer cette étude de la caractéristique volatilité sans donner quelques indications sur les essences dites "spéciales" qui ne sont pas destinées à l'alimentation des moteurs, mais dont les propriétés particulières proviennent précisément de la "coupe de distillation".

Ces coupes sont effectuées sur des essences de première distillation et tiennent compte des propriétés particulières de certains hydrocarbures en vue de leur utilisation dans l'industrie comme solvants ou autres usages.

Le tableau ci-après résume les coupes et usages principaux de ces essences spéciales.

| Produit | Caractéristiques | Usages |
|---|---|---|
| Essence A | Distillation 40/100 | Fabrication des colles caoutchouc. |
| Essence B | Distillation 60/80 | Extraction des graines oléagineuses. |
| Essence C | Distillation 70/100 | Distillation de l'alcool. |
| Essence E | Distillation 100/120 | Héliogravure, peintures et vernis, caoutchouc. |
| Essence F | Distillation 100/160 | Peintures et vernis, nettoyage à sec, produits d'entretien. |
| Essence G | Distillation 35/70 | Ether de pétrole ou gazoline, coiffeurs, laboratoires. |
| Essence H | Essence tourisme sans alcool | Droguistes, plombiers. |
| White-spirit | Distillation 150/190 | Peintures, produits d'entretien. |
| Kérosène sans odeur | Distillation 190/240 | Parfumerie, insecticides. |


Températures
370
360
350
340
330
320
310
300
290
280
270
260
250
240
230
220
210
200
190
180
170
160
150
140
130
120
110
100
90
80
70
60
50
40
30
Gas-oil
J.P.5
Lampant
J.P.4
Essence tourisme
Super hiver
Aviation 115-145
Aviation 100/130
% distillé
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
55
60
65
70
75
80
85
90
95
100%

# POUVOIR CALORIFIQUE

Le rôle du moteur est de transformer l'énergie calorifique résultant de la combustion du carburant en énergie mécanique. L'énergie développée par le piston est fonction :

a) De l'énergie interne du mélange carburé au moment de la combustion qui donne en quelque sorte le potentiel d'énergie calorifique disponible dans le carburant.

b) Du rendement de combustion qui tient compte de ce que celle-ci ne peut être pratiquement parfaite.

c) Du rendement thermodynamique qui indique la fraction optima des calories susceptibles d'être transformée en travail mécanique.

## A. Energie interne

Elle est constituée approximativement par le pouvoir calorifique inférieur à volume constant du carburant (l'eau n'étant pas condensée et la combustion ayant lieu sensiblement à volume constant). Ce pouvoir calorifique doit être corrigé de la chaleur de vaporisation $\lambda$ du carburant, en supposant celui-ci, en première approximation, comme totalement vaporisé et corrigé enfin de l'expansion moléculaire :

$$\frac{n_3}{n_2}$$

$n_2$ et $n_3$ étant respectivement le nombre de molécules contenues dans le mélange théorique, avant et après la combustion.

On a proposé d'appeler cette énergie interne "pouvoir énergétique", dont l'expression simplifiée est :

$$\frac{n_3}{n_2} (Pi_v + \lambda)$$

Le tableau, page 60, donne quelques valeurs de ce "pouvoir énergétique" pour quelques carburants.

## B. Rendement de combustion

Il dépend, non seulement du moteur, mais aussi du carburant. Il est, non seulement fonction du dessin du moteur, mais aussi de la qualité de la combustion. Le carburant intervient

| Produits | Ps | Pi | Ps au litre | Pi au litre | $\lambda$ | $\frac{n_3}{n_2}$ | $\frac{n_3}{n_2}(Pi+\lambda)$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Heptane | 11 530 | 10 660 | 8 450 | 7 800 | 81,5 | 1,0555 | 11 350 |
| Isooctane | 11 510 | 10 650 | 8 000 | 7 400 | 82 | 1,0573 | 11 360 |
| Essence | 11 200 | 10 500 | 8 300 | 7 800 | 82 | 1,057 | 11 180 |
| Benzène | 9 860 | 9 440 | 8 720 | 8 350 | 101,5 | 1,0135 | 9 650 |
| Toluène | 10 210 | 9 680 | 8 900 | 8 420 | 96 | 1,0226 | 10 000 |
| Ethanol | 7 070 | 6 400 | 5 600 | 5 100 | 218,5 | 1,0649 | 7 040 |
| Ethanol 95° | 6 470 | 5 776 | 5 300 | 4 730 | 236 | 1,052 | 6 340 |
| Méthanol | 5 375 | 4 702 | 4 300 | 3 800 | 280 | 1,0649 | 5 282 |

dans ce rendement, d'une part, par son "état chimique" (composition, rapport C/H, etc.) et, d'autre part, par son "état physique" (combustion à l'état gazéifié ou à l'état de gouttelettes liquides). La valeur de ce rendement peut varier entre 0,65 et 0,85 suivant la charge et le type du moteur.

C. Rendement thermodynamique $\rho = 1 - \frac{1}{T^{\gamma - 1}}$

Il dépend du rapport volumétrique T et de $\gamma$ rapport des chaleurs spécifiques à pression et à volume constants du fluide évoluant. Ce terme $\gamma$ dépend lui-même de la qualité de la combustion et les chercheurs ne sont pas encore tellement fixés sur sa valeur.

## Consommation en carburant

La consommation en carburant d'un moteur est donc fonction des trois points énumérés précédemment. Le premier (pouvoir énergétique) qui indique la quantité de calories susceptibles d'être transformées en travail, les deux derniers, la fraction réellement utilisée de ces calories.

Quand on fait le calcul du pouvoir énergétique (voir tableau) pour différents carburants et compte tenu des approximations et des hypothèses ayant conduit à son établissement, on s'aperçoit que ce "pouvoir énergétique" est assez voisin (2 à 4 % près) du pouvoir calorifique supérieur à volume constant.

C'est donc ce pouvoir calorifique supérieur à volume constant

que nous retiendrons comme critère de la consommation en carburant d'un moteur. Ce fait est d'ailleurs sanctionné par la pratique et l'on s'aperçoit qu'à performance équivalente, les consommations en poids mesurées sur les voitures sont inversement proportionnelles aux pouvoirs calorifiques supérieurs des carburants utilisés; ceci dans les meilleurs conditions de réglage de la carburation pour l'utilisation de chacun des carburants. S'il s'agit de consommation en litres, elle est inversement proportionnelle au pouvoir calorifique supérieur au litre.

En résumé, cette caractéristique "pouvoir calorifique" du carburant a une influence directe sur la consommation du moteur.

Remarque

Pratiquement, les pouvoirs calorifiques des essences commerciales courantes sont assez voisins et, en moyenne, de 11 200 pour le supérieur au kilo et 8 100 pour le supérieur au litre. Il est à remarquer que le raffineur n'est pas maître de cette caractéristique et qu'une fois le brut à traiter, le mode de traitement de ce brut et la coupe de l'essence déterminés, le pouvoir calorifique se trouve fixé.

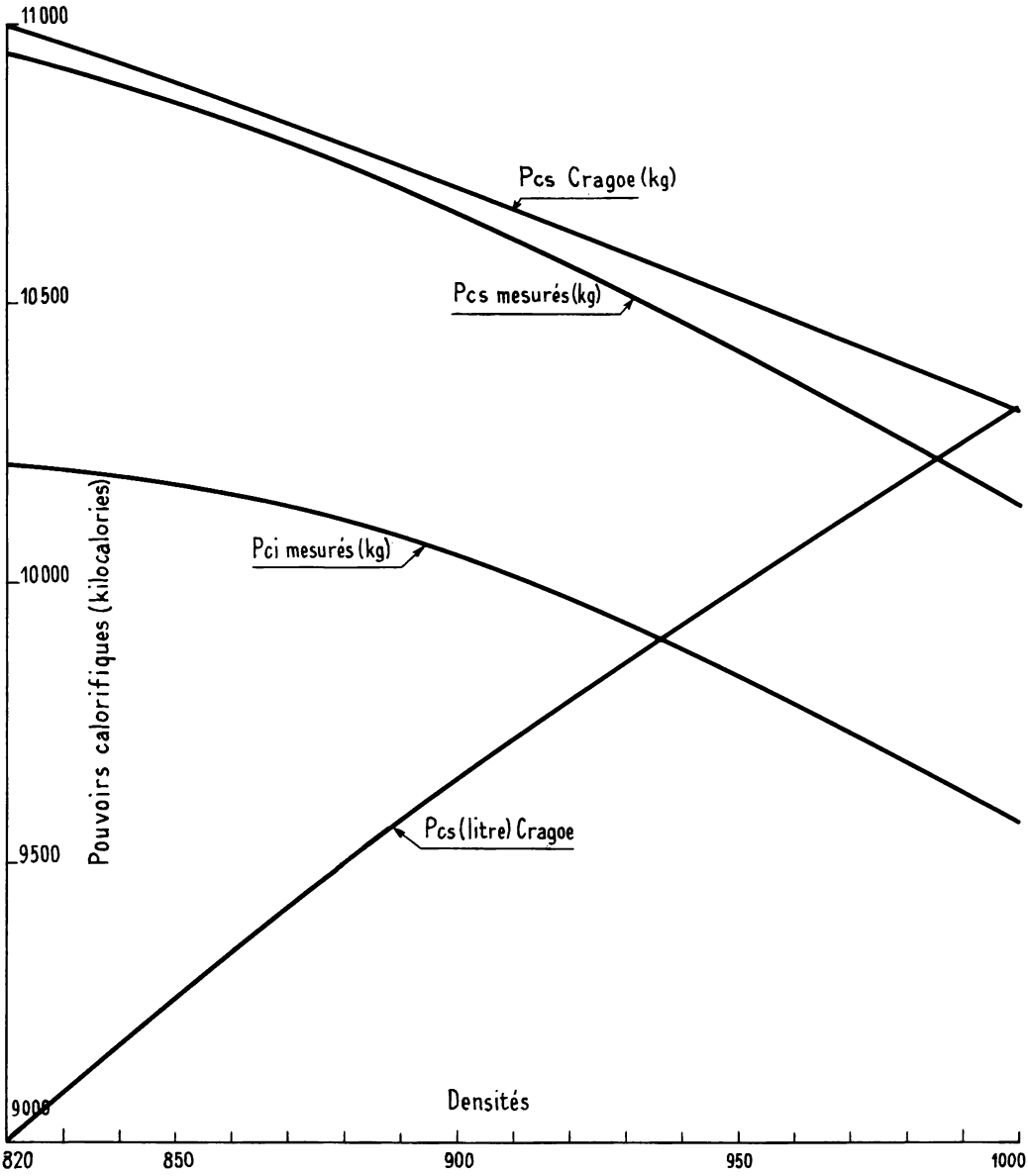
Indiquons, de plus, que le pouvoir supérieur au litre augmente le plus généralement avec la densité du carburant.

Cas du benzol

Quand on utilise, dans une voiture, du benzol ou des mélanges essence-benzol, on enregistre soit une augmentation de puissance du moteur, soit, à performance équivalente, une diminution de consommation. Ceci tient à ce que le pouvoir calorifique au litre de benzol est plus élevé que celui de l'essence courante.

## Pouvoir calorifique de la cylindrée

C'est celui d'un volume déterminé d'air et de carburant dans des proportions correspondant à la combustion complète. Certains auteurs ayant remarqué que les calculs, pour des carburants très différents, conduisent aux mêmes résultats à quelques pour-cents près, en déduisent que l'on peut toujours obtenir sensiblement la même puissance d'un moteur, quel que soit le carburant. En pratique, ce raisonnement, par trop simpliste, se révèle faux et l'expérience de la course montre que l'on peut obtenir une puissance notablement plus grande avec des carburants froids comme le méthanol ou l'éthanol, à la condition, évidemment, d'y mettre le prix au point de vue de la




Pouvoirs calorifiques supérieurs et inférieurs (à volume constant)

consommation. Cette erreur tient au fait que la vaporisation des carburants froids comme le méthanol ou l'éthanol n'est faite que très partiellement, le remplissage du moteur s'en trouve amélioré.

## Quelques données pratiques sur le "pouvoir calorifique"

a) On peut obtenir le Pc supérieur à volume constant à partir du Pc supérieur à pression constante par la formule :

$$Pcsp = Pcsv + 1,35\ H$$

H étant la teneur en hydrogène (% en poids) de combustible.

Pratiquement, la correction 1,35 H est très faible (15 à 17 calories) et peut être négligée.

b) La relation approchée entre pouvoir calorifique supérieur et inférieur est la suivante :

$$Pci = Pcs - (53\ H + 6\ E)$$

H est la teneur en hydrogène (% en poids),
E est la teneur en eau (% en poids).

La teneur en hydrogène varie pratiquement de 13,5 à 10,5 % en passant du gas-oil au fuel lourd n° 2.

L'écart est donc plus important pour les qualités fluides que pour les lourdes.

c) Relation approchée entre le pouvoir calorifique supérieur et la densité, formule de Cragoe :

$$Pcs\ (kcal/kg) = 12\ 400 - 2\ 100\ d_2$$

d est la densité à 60°F, mais on peut l'utiliser en prenant la densité 15/4. Cette formule donne des résultats un peu forts (voir diagramme).

En pratique, on peut admettre les chiffres moyens suivants pour les différents produits commerciaux courants :

| | Essence | Pétrole | Gas-oil | Fuel domestique | Fuel léger | Fuel lourd n°1 | Fuel lourd n°2 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Pcs | 11 200 | 10 950 | 10 850 | 10 750 | 10 600 | 10 450 | 10 350 |
| Pci | 10 500 | 10 300 | 10 200 | 10 100 | 10 100 | 9 850 | 9 750 |

## CHALEUR DE VAPORISATION

Pour faire passer l'unité de poids d'un carburant de l'état liquide à l'état de vapeur, il faut lui fournir, à partir de sa température d'ébullition, un certain nombre de calories, et ceci sans qu'il y ait changement de température.

La chaleur de vaporisation d'un carburant est donc le nombre de calories qu'il faut fournir pour vaporiser complètement 1 gramme de carburant. Elle se mesure en calories-gramme.

Le tableau ci-dessous donne quelques valeurs de cette caractéristique pour des carburants d'usage courant.

| Carburants | Chaleur de vaporisation en calories-gramme |
|---|---|
| Essence tourisme (moyenne) ..... | 76 |
| Octane normal ..... | 71 |
| Benzène ..... | 95 |
| Benzol à 90 % ..... | 107 |
| Alcool éthylique ..... | 206 |
| Alcool méthylique ..... | 282 |
| Acétone ..... | 124 |
| Ether sulfurique ..... | 90 |

Cette caractéristique est particulièrement importante puisqu'elle conditionne, pour un moteur donné, d'une part la température à l'admission du mélange carburé, par conséquent le degré de remplissage du moteur et la puissance maxima que l'on pourra en tirer, et, d'autre part, ceci conjointement avec la caractéristique "volatilité", l'état physique du mélange que nous avons déjà défini et qui influe grandement sur la qualité de la combustion et, par voie de conséquence, sur la consommation du moteur.

## Relation entre la puissance, la consommation d'un moteur et la "chaleur de vaporisation" du carburant

La tubulure d'admission, située entre le carburateur et les cylindres, a pour rôle de conduire et de distribuer les gaz carburés dans les différents cylindres; ces gaz carburés sont constitués de trois parties : de l'air carburant, de l'essence à l'état de vapeur et enfin de l'essence à l'état liquide en cours de vaporisation. Cette dernière partie emprunte à la tubulure d'admission même la chaleur nécessaire à sa vaporisation; il y a donc transport de chaleur du moteur vers la veine carburée par l'intermédiaire des parois de la tubulure.

Si le combustible a une faible chaleur de vaporisation, il trouvera facilement dans son court séjour dans la tubulure les calories nécessaires à sa vaporisation et les cylindres seront alimentés par un mélange d'air et de vapeur d'essence, condition éminemment favorable à une bonne combustion et, par voie de conséquence, on enregistrera une faible consommation. Le revers de la médaille est que la valeur d'essence à poids égal tient beaucoup plus de place que le liquide; on sera donc rapidement limité dans le remplissage et la puissance maxima développée par le moteur sera relativement faible.

Si, au contraire, le combustible a une forte chaleur de vaporisation, comme c'est le cas par exemple pour l'alcool, il ne trouvera pas dans la tubulure les calories nécessaires à sa vaporisation complète; il s'ensuit qu'une fraction importante arrivera dans les cylindres à l'état liquide, c'est-à-dire dans de mauvaises conditions au point de vue de la combustion. La consommation sera donc élevée; en revanche, la quantité de carburant introduite sera relativement forte et le moteur donnera son maximum de puissance.

### Compromis puissance-consommation

Nous avons vu par ce qui précède que l'on ne peut obtenir à la fois d'un moteur et pour un carburant donné, le maximum de puissance et le minimum de consommation. Les constructeurs s'en tiennent donc normalement à un compromis. Ceci explique la floraison des systèmes que l'on trouve dans le commerce : soit pour améliorer la consommation d'une voiture de série (tubulure d'admission adaptable plus chaude, déflecteurs ou même petite turbine destinés à améliorer la pulvérisation, etc.), soit d'augmenter la vitesse maxima de la voiture (tubulure d'admission froide à forte section). On ne peut nier que certains de ces systèmes soient efficaces, mais dans les deux cas il y a toujours un inconvénient, généralement passé sous silence par l'inventeur de ces appareils.

L'amélioration de la consommation d'une voiture de série est toujours possible à la condition de consentir une perte de puissance et de reprise.

L'amélioration de la puissance d'une voiture de série est toujours possible à la condition de consentir une augmentation de consommation.

Les constructeurs sont donc toujours obligés de s'en tenir à un compromis entre les performances possibles (vitesse maxima et accélération) et consommation en carburant.

## CAS DES CARBURANTS DE COMPETITION

Il s'agit là de carburants spéciaux, le plus souvent à base d'alcool. Nous traitons ce sujet dans le chapitre "Chaleur de vaporisation" parce que c'est cette caractéristique qui confère aux carburants leurs principales qualités. Les carburants dits "froids" sont des carburants à chaleur de vaporisation élevée (alcool éthylique - alcool méthylique).

### Problème de la course

On cherche à obtenir d'un moteur de course le maximum de puissance pour une cylindrée donnée, les questions de consommation n'intervenant pas ou peu.

En formule "deux litres" sans compresseur on a atteint 200 ch en pointe. En formule I "2 500 litres", on a atteint près de 300 ch en 1957, les voitures type "grand prix" pouvant atteindre 300 km/h. Les vitesses atteintes ayant été jugées dangereuses, la cylindrée a été réduite et on peut penser que les puissances atteintes en formule II 1 500 $cm^3$ seront de l'ordre de 200 ch susceptibles d'une vitesse de l'ordre de 260 km/h. Il est à noter en outre qu'à partir de 1958 dans le but de limiter la performance et aussi de "rapprocher" les moteurs de course des moteurs normaux, les carburants spéciaux seront interdits, les voitures devant utiliser obligatoirement des supercarburants normaux du commerce.

En dehors des problèmes d'ordre mécanique qui se posent aux constructeurs d'un moteur de course (affolement des soupapes - refroidissement, etc.), il s'agit de "remplir" au maximum ce qui suppose une carburation froide. C'est l'éthanol ou mieux encore le méthanol dont la chaleur de vaporisation est environ quatre fois supérieure à celle de l'essence qui formera la base des carburants course, les autres produits étant ajoutés pour en corriger les défauts.

## Composition d'un carburant pour la course

En dehors de l'indice d'octane du carburant qui doit être en rapport avec le taux de compression du moteur (ce qui est toujours réalisé pour les carburants spéciaux à base d'éthanol et de méthanol), la composition du carburant devra tenir compte :

a) De la nature du circuit (bol de vitesse à Montlhéry ou circuit accidenté comportant des reprises);

b) De la température extérieure (ou de la saison);

c) Du règlement de la course (certains règlements limitent la consommation).

Les constituants utilisés peuvent être les suivants :

1. Le méthanol ou l'éthanol, constituants de base à forte chaleur de vaporisation, mais à faible pouvoir calorifique au litre, peuvent être utilisés dans des proportions de 50 à 95 %.
2. Le benzol qui donne du pouvoir calorifique au litre et diminue la consommation d'ensemble peut être utilisé dans des proportions allant de 0 à 30 %.
3. L'acétone qui facilite les départs (impossibles avec du méthanol ou de l'éthanol pur) qui, en outre, atténue le défaut d'auto-allumage propre au méthanol, peut être utilisée dans des proportions de 2 à 12 %.
4. L'essence légère 35/70 qui facilite les départs à froid et qui peut être utilisée dans des proportions de 2 à 8 %.
5. L'essence aviation ou mieux une certaine fraction 80/120 d'essence à indice d'octane élevé, améliore les reprises dans les "épingles à cheveux", peut être utilisée dans des proportions de 10 à 20 %.
6. Des hydrocarbures nitrés comme nitrobenzène, nitrohexane, nitrométhane, qui donnent de la puissance (augmentation de vitesse de combustion), qui apportent de l'oxygène, ce qui permet d'enrichir, peuvent être utilisés jusqu'à 12 % au maximum (risque d'échauffement des pistons).
7. De l'eau distillée, ou mieux de l'eau oxygénée, permet d'"éteindre" l'auto-allumage propre au méthanol, peut être utilisée jusqu'à 3 %.
8. De l'huile de ricin jusqu'à 1,5 %, destinée surtout à améliorer le graissage des cylindres immédiatement après le départ (moteur pas encore assez chaud).
9. Etc.

On voit par ce qui précède que ces carburants spéciaux constituent de véritables cocktails où chacun des produits a un but bien précis. Leur composition est en tout cas parfaitement empirique et ne devient définitive qu'après plusieurs essais avec des formules différentes.

A titre d'exemple, nous donnons ci-dessous la composition d'un carburant type grand prix :

a) Pour l'anneau de vitesse Montlhéry au mois de juin :

| | |
|---|---|
| Méthanol | 90 % |
| Acétone | 4 % |
| Essence légère | 4 % |
| Eau | 1 % |
| Ricin | 1 % |

b) La même voiture au grand prix de Monte-Carlo pourra utiliser :

| | |
|---|---|
| Méthanol | 50 % |
| Benzol | 30 % |
| Acétone | 8 % |
| Essence aviation | 10 % |
| Eau | 1 % |
| Ricin | 1 % |

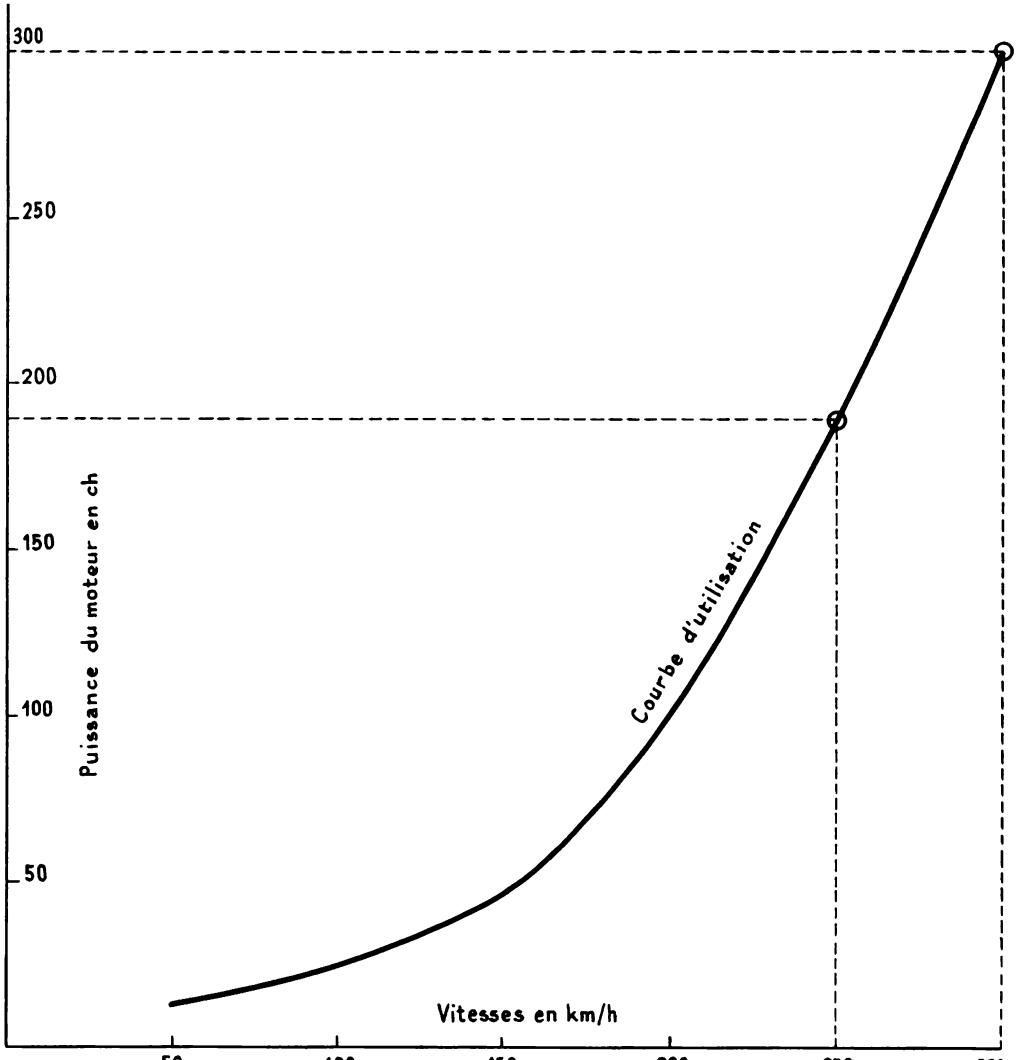
On voit que l'essence entre assez peu dans la composition des carburants spéciaux susceptibles de fournir des puissances élevées (sans tenir compte des consommations). Le prix de ces carburants est très élevé. Aussi a-t-on pensé qu'il vaudrait mieux, pour l'avenir et pour ramener la course à son véritable but qui est l'amélioration des moteurs et des carburants normaux, imposer l'utilisation des carburants du commerce. En fait, l'utilisation de ces carburants est obligatoire depuis le premier janvier 1958.

## Remarque sur la puissance possible des moteurs de course

L'azote de l'air comburant est un composé inerte indésirable qui, en prenant beaucoup de place, limite le remplissage du moteur. On a tendance actuellement à introduire dans le carburant même l'oxygène nécessaire à la combustion et on peut concevoir, si les règlements l'autorisaient, que les voitures de course aient à bord des bouteilles d'oxygène par exemple pour appoint momentané de puissance. On peut entrevoir pour l'avenir des puissances massiques triples de celles obtenues actuellement, à la condition que le refroidissement

soit en rapport et que les pistons ne "fondent" pas . A moins que les règlements n'y mettent bon ordre, on s'achemine lentement vers la fusée .

A titre documentaire, nous donnons ci-dessous la courbe d'utilisation d'une voiture de course type grand prix, formule 1, 1957. Le Cx de ces voitures n'est d'ailleurs pas tellement bon (supérieur à une voiture sport carennée des 24 heures du Mans), le dessin de la carrosserie tenant compte notamment que les pilotes tiennent essentiellement à voir leurs roues avant.




Courbe d'utilisation d'une voiture de course type grand prix formule1

## CAS DE L'ALCOOL ET DES MELANGES ALCOOLISES

A l'occasion de l'étude de la "chaleur de vaporisation", nous ne pouvons passer sous silence le problème de l'utilisation de l'alcool, puisque les propriétés particulières de ce carburant tiennent pour une large part à cette caractéristique.

La chaleur de vaporisation de l'alcool éthylique est presque trois fois plus forte que celle de l'essence; il en résulte les conséquences suivantes :

A. Utilisation de l'alcool pur dans un moteur construit pour l'essence

Ce cas s'est présenté pendant la guerre et constitue la plus mauvaise utilisation que l'on puisse faire de l'alcool. L'usager se contente d'un simple réglage de carburation (augmentation du gicleur). Outre que l'utilisation de l'alcool nécessite un dispositif de démarrage à l'essence, la consommation, si l'on veut conserver à peu près la performance, est multipliée par 1,6 par rapport à l'essence; il est à remarquer que le rapport du pouvoir calorifique supérieur au litre de l'essence et de l'alcool n'est que de 1,44 : cette différence provient de ce que les calories, dans ce cas, sont très mal utilisées. Un réchauffage intense de la tubulure d'admission fera tendre ce rapport de 1,6 vers 1,44.

B. Utilisation de mélange essence-alcool déshydraté

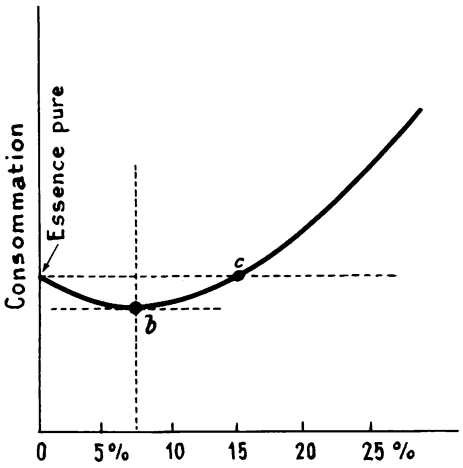
La proportion minima d'alcool de l'essence est fixée pour des raisons de stabilité. Ce minimum pratique, dans un réseau de distribution, ne peut être inférieur à 10 % sans gros danger de séparation.

Un mélange essence-alcool déshydraté est d'autant plus stable qu'il y a moins d'eau dans le mélange, que la proportion d'alcool dans le mélange est plus élevée et enfin que la température est plus élevée.

La proportion maxima d'alcool dans le mélange est fixée à 15 % pour des raisons d'utilisation. Une proportion plus forte d'alcool entraînerait en effet, pour l'usager, à des transformations importantes de son moteur, ce qui n'est pas admissible.

Les mélanges essence-alcool et la consommation (voir fig. p.71)

Quand la proportion d'alcool est faible, la consommation du mélange diminue par rapport à celle de l'essence pure (à la condition que




Consommation en fonction de la teneur en alcool

l'on n'ait rien changé au carburateur); elle passe par un minimum pour remonter ensuite plus vite même que le rapport du pouvoir calorifique ne le laisserait prévoir.

Ce minimum s'explique par deux causes :

a) Amélioration certaine du rendement de combustion.

b) Par le fait que les carburateurs normaux sont toujours réglés un peu riches et que le simple fait de substituer de l'alcool qui n'a besoin que de 8 g d'air pour brûler au lieu de 14 g pour l'essence, a tendance à appauvrir le mélange.

La position de ce minimum dépend du dessin et du réchauffage de la tubulure d'admission. Il est d'autant plus à droite que la tubulure est plus chaude. Ce fait explique qu'avec un mélange à 15 % d'alcool, certaines voitures accusent soit un gain, soit une augmentation de consommation.

Pratiquement, la distribution généralisée d'un mélange essence-alcool à 15 % s'accompagne sur l'ensemble des voitures d'une augmentation de consommation générale de 4 à 5 %. Ceci tient à ce qu'il arrive un moment (l'hiver en particulier) où, pour pallier aux inconvénients des mélanges un peu pauvres, l'usager devra augmenter son réglage et ce réglage il le conservera.

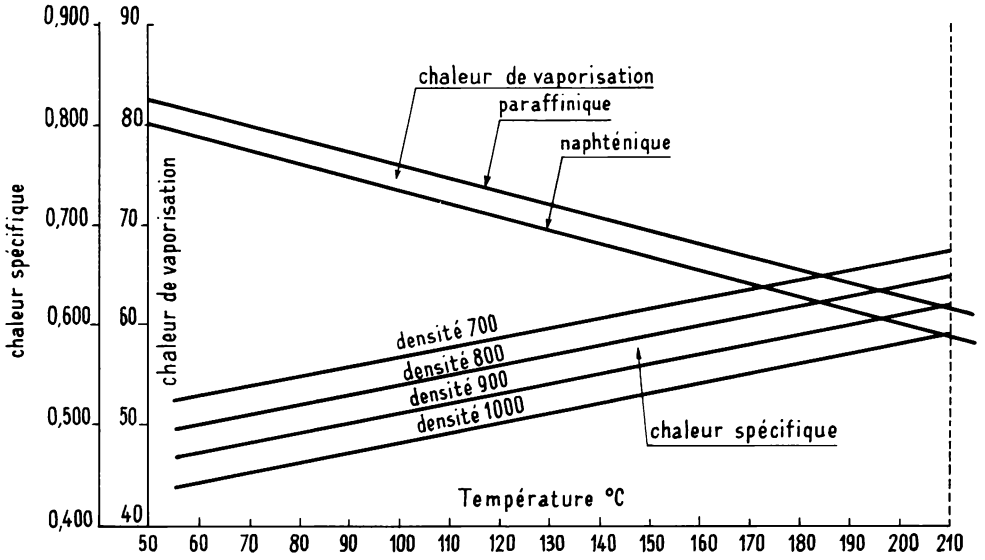
## Inconvénients des mélanges alcoolisés

1. Difficultés de départ à froid l'hiver et mises en action laborieuses.

2. Usure plus rapide des moteurs par le lavage des cylindres et la dilution de l'huile de graissage.

3. Aptitude plus marquée au "tampon de vapeur".

4. Séparation en cas d'introduction d'eau accidentelle.




Variation de la chaleur de vaporisation et spécifique en fonction de la température et de la densité

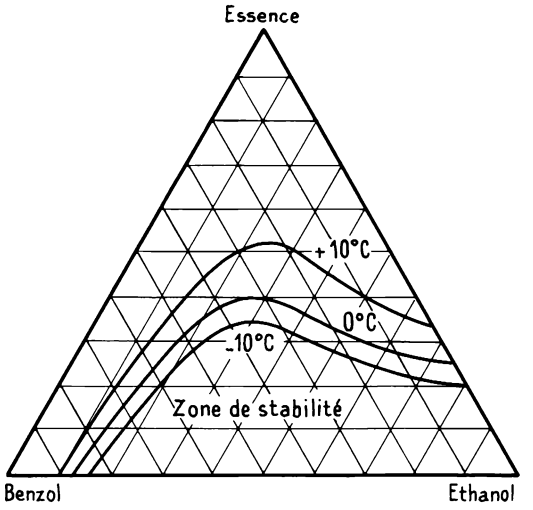
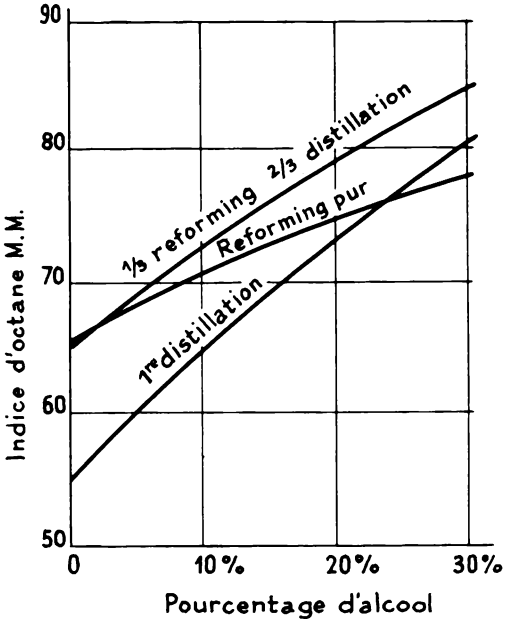



Diagramme de stabilité, mélanges ternaires




5. Attaque des peintures et vernis de carrosserie.

6. Décapage des citernes et des réservoirs amenant des obstructions de canalisations.

Tous ces inconvénients sont mineurs par rapport à ceux d'ordre économique relatifs aux prix de revient et à l'augmentation générale de la consommation.

Avantages de l'alcool

Outre que les moteurs ont tendance à rester plus propres, l'avantage majeur de l'alcool est qu'il constitue un excellent agent de mélange pour augmenter l'indice d'octane d'une essence, ainsi que le montre la figure ci-dessus.

## TENSION DE VAPEUR

Cette caractéristique mesure l'aptitude plus ou moins prononcée d'un carburant à émettre des vapeurs.

Si l'on introduit de l'essence dans un récipient et que l'on bouche ce récipient, il se dégage des vapeurs dans l'espace libre jusqu'à une certaine pression; cette pression, pour une température donnée, est caractéristique du carburant, c'est ce que l'on appelle la tension de vapeur. Elle se mesure, soit en kilo par centimètre carré, soit en millimètre de mercure, soit en hectopièzes.

La tension de vapeur est couramment déterminée sur les carburants. Pour des produits aussi complexes que ceux-ci, il ne peut être question que d'une méthode entièrement empirique, et la coutume commerciale est à utiliser la méthode Reid qui, opérant à 100 °F (37,8 °C) avec un appareil déterminé, donne des chiffres conventionnels qui ont été reliés à de nombreuses observations pratiques.

En règle générale, la tension de vapeur d'une essence est surtout influencée par celle des parties les plus légères, fractions de distillation 5 ou 10 %.

L'introduction ou le recyclage de butane dans le carburant augmente la tension de vapeur, c'est souvent un moyen en raffinerie de régler cette caractéristique (1 % de butane équivaut approximativement à une augmentation de 50 g de tension de vapeur).

La précision de la mesure est de ± 20 g.

Nous donnons, dans le tableau ci-dessous, les tensions de vapeur Reid de quelques carburants usuels :

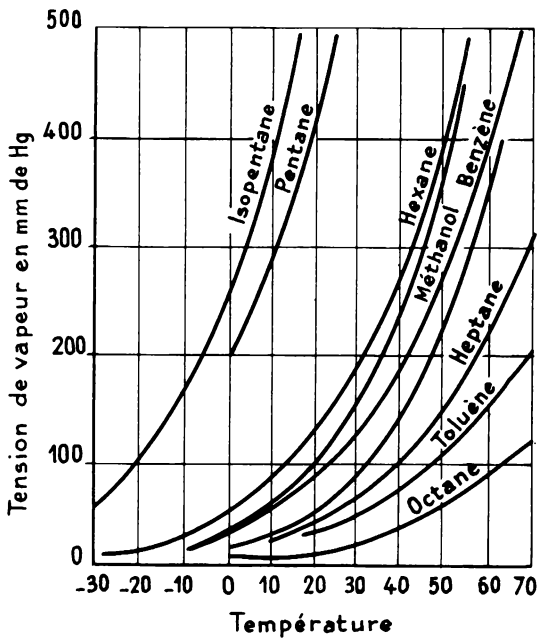
| Carburants | Tension de vapeur Reid à 37,8°C en $kg/cm^2$ |
|---|---|
| Essence tourisme ..... | 0,600 |
| Essence aviation ..... | 0,400 (max 0,500) |
| Alcool éthylique (99,5°C) ..... | 0,165 |
| Alcool méthylique ..... | 0,320 |
| Benzène ..... | 0,220 |
| Acétone ..... | 0,334 |
| Ether ..... | 1,200 |

ainsi que les courbes donnant la variation de la tension de vapeur en fonction de la température pour quelques carburants :

Examinons maintenant les conséquences des variations de cette caractéristique sur le fonctionnement du moteur.

## 1. - INFLUENCE SUR LE DEPART A FROID D'UN MOTEUR D'AUTOMOBILE

Un combustible à forte tension de vapeur facilitera les départs à froid, c'est ainsi que le meilleur moyen de faire partir un moteur l'hiver est d'ajouter dans la cuve même du carburateur quelques centimètres cubes d'éther dont



la tension de vapeur est très élevée. Remarquons d'ailleurs qu'il s'agit là de tension de vapeur à basse température et non de tension Reid à 37,8°C. C'est ainsi d'ailleurs que la tension de vapeur Reid du benzol qui est plus faible que celle d'une essence ordinaire a, au contraire, une tension supérieure à basse température.

Nous avons vu précédemment, à propos de la caractéristique "volatilité" que le point de distillation 10 % avait aussi une influence sur la facilité de départ à froid. Cette aptitude est donc fonction, d'une part, de la tension de vapeur qui caractérise une "facilité" de vaporisation et, d'autre part, du point 10 % qui caractérise une "quantité" de carburant vaporisé. Ces deux facteurs sont prépondérants dans les questions de départ à froid.

## 2. - INFLUENCE SUR LE FONCTIONNEMENT DU MOTEUR A CHAUD. TAMPON DE VAPEUR EN AUTOMOBILE

Cette question a été traitée lors de l'étude de la caractéristique "volatilité". Nous avons vu que la tension de vapeur avait également sa part de responsabilité dans les incidents de tampon de vapeur.

## 3. - LE TAMPON DE VAPEUR EN AVIATION

Le phénomène du tampon de vapeur est particulièrement à craindre en aviation, en raison de la diminution de pression due à l'altitude. Vous savez que cette diminution de pression favorise l'ébullition. C'est ainsi, pour reprendre l'exemple de l'eau, que celle-ci bout à 100°C au niveau de la mer et aux environs de 80°C au sommet du mont Blanc. Il en est de même pour les carburants dont les parties les plus légères se mettraient à bouillir et à faire du "vapor lock" aussitôt que l'avion prendrait une certaine altitude. Fort heureusement, la température de l'air s'abaisse quand on monte et ceci agit en sens inverse de la diminution de pression. Si donc le réservoir d'essence était à la même température que l'air ambiant, il n'y aurait aucune crainte de formation de tampon de vapeur dans le moteur de l'avion. Malheureusement, il n'en est pas ainsi et la température du réservoir diminue beaucoup moins vite que celle de l'air ambiant, ce décalage fait réapparaître le risque d'ébullition partielle du carburant et de formation de tampon de vapeur. C'est la raison pour laquelle les essences aviation doivent avoir une tension de vapeur plus faible que les essences pour l'automobile. Ce fait explique aussi pourquoi les essences aviation doivent être moins riches en produits légers et commencer à distiller à une température supérieure à celle des essences auto.

La température de formation du tampon de vapeur d'un carburant correspondant à une altitude quelconque est donnée par la formule suivante :

$$T = 259 - 140 \log \left( \frac{R \times 14,7}{P} \right)$$

où :

T est la température de formation du tampon de vapeur en degrés fahrenheit;

R la tension de vapeur Reid de l'essence;

P la pression atmosphérique correspondant à l'altitude en livres par pouce carré.

On diminue considérablement le risque de tampon de vapeur en aviation par une étude soignée du système d'alimentation en carburant.

Avec l'augmentation du plafond des avions, de nombreux travaux ont été faits dans ce sens, notamment la mise sous pression des canalisations entre réservoir et pompe d'alimentation du moteur, par des pompes auxiliaires mues électriquement et placées dans les réservoirs de carburant.

De même, des essais à haute altitude pour étudier le rôle de l'air dissous, montrèrent que celui-ci reste en solution sursaturée jusqu'à ce que l'altitude où se produit l'ébullition soit atteinte; à ce moment, il y a dégagement rapide de l'air qui tend ainsi à aggraver les effets de l'ébullition.

Cette question sera traitée plus en détails dans l'étude des carburants pour turboréacteurs.

## Normes légales pour les tensions de vapeur

Pour les carburants automobile :

Essence ordinaire et super : la tension Reid maxima sera de 800 g/cm$^2$ du 15-10 au 30-4 et inférieure à 650 g/cm$^2$ du 1-5 au 14-10.

Pour les carburants aviation : 100/130 et 115/145

Tension Reid en pièzes { min 38 / max 50

Pour les carburants pour turboréacteurs :

JP 4 tension Reid max 140 g/cm$^2$

## Tension de vapeur calculée

Il y a une relation entre la tension de vapeur Reid et la richesse en produits légers et notamment le point 5 et 20 % évaporée. On peut se servir de l'abaque suivant.

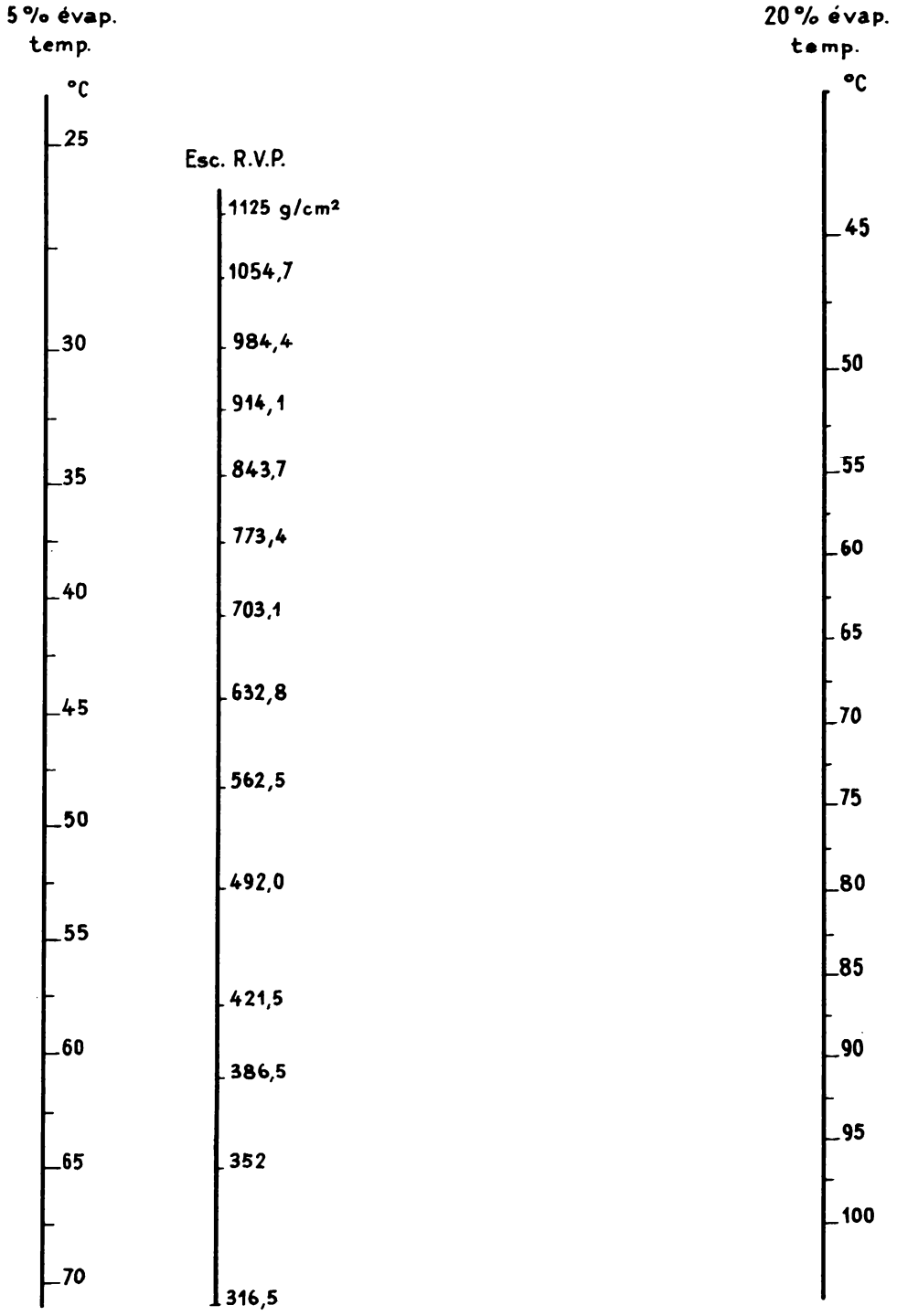



Diagramme donnant la tension de vapeur Reid en fonction du 5% et du 20% distillé

# INDICE D'OCTANE

C'est la caractéristique la plus importante avec la "volatilité". Cette dernière conditionne en grande partie l'"agrément de conduite" et la satisfaction du conducteur, l'indice d'octane,lui,est lié aux questions de "rendement", le mot "rendement" étant pris dans son sens le plus général.

L'indice d'octane ne peut pas être considéré comme un critère de qualité unique; c'est ainsi,par exemple,que l'utilisation dans une voiture d'un carburant aviation à 100 octane peut être décevante en ce qui concerne les départs à froid, les mises en action, la bonne conservation des soupapes, etc.

L'utilisation d'un carburant automobile à 96 octane dans une voiture conçue pour fonctionner normalement avec du 80 n'apportera au conducteur aucune satisfaction supplémentaire. Avant d'étudier cette caractéristique "octane", il est indispensable d'ouvrir une parenthèse sur les questions de "rendement".

## RENDEMENT ET INDICE D'OCTANE

### Rendement d'une voiture

Si l'on considère l'ensemble moteur-voiture, on peut mesurer pratiquement un rendement moyen par l'établissement d'un diagramme de marche donnant les chevaux utilisés en fonction du temps (voir fig. p. 79) et ceci pour une utilisation moyenne (ville-route).

On peut obtenir les chevaux nécessaires à chaque instant du fonctionnement de la voiture, soit par mesure directe (torsiographe mesureur de couple), soit par l'enregistrement simultané de la vitesse de la voiture et de la dépression qui permet de connaître la puissance réellement utilisée.

La surface du diagramme représente le nombre de cheval-heure utilisés entre le temps 0 et le temps T. Sachant d'autre part ce que l'on a consommé de carburant entre ces temps, il est facile de connaître la consommation pratique en utilisation en grammes par cheval-heure, donc de connaître le pourcentage de calories utiles. Cela conduit à des consommations de l'ordre de 450 g/ch.h, c'est-à-dire à une utilisation de 14 % des calories.

La méthode ci-dessus est difficile de réalisation, on peut se

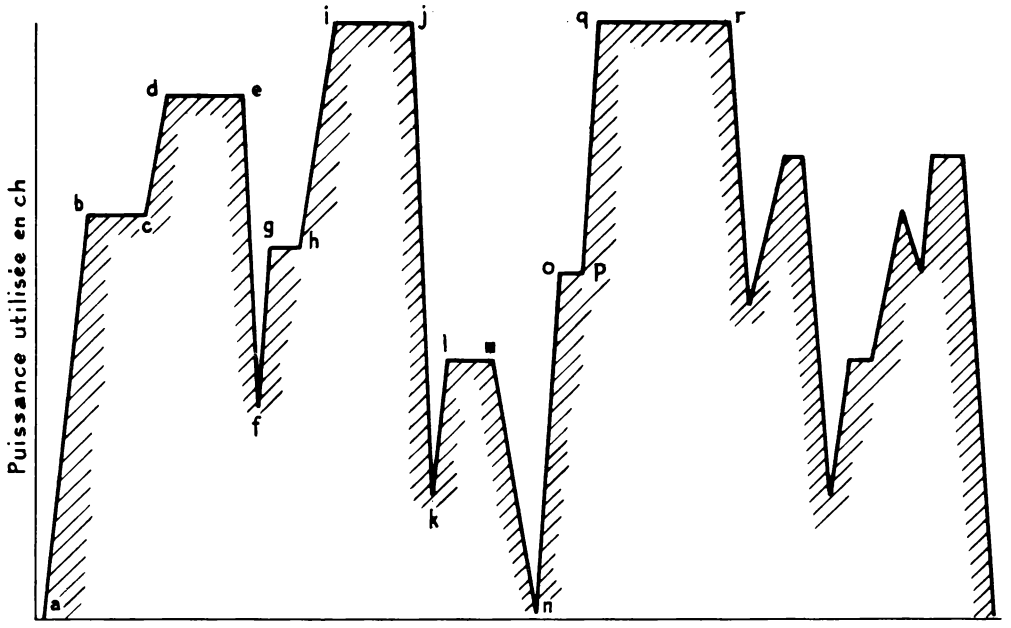



Diagramme de marche d'une voiture

| | | | |
|---|---|---|---|
| ab | départ et accélération | gh | vitesse constante |
| bc | vitesse constante à la ½ charge | hi | accélération |
| cd | accélération | ij | vitesse palier plein gaz |
| de | vitesse constante 8/10 charge | jk | coup de frein |
| ef | coup de frein | | etc. |
| fg | accélération | | |

contenter pour des comparaisons de mesurer le rendement global de la voiture en vitesse stabilisée par des mesures de consommation. Cette méthode exige aussi la connaissance de la courbe d'utilisation de la voiture (puissance nécessaire à la jante en fonction de la vitesse). Ce rendement global s'établit ainsi :

$$\rho_g = \frac{\text{Equivalent calorifique du cheval-heure}}{\text{Consommation effective en calories au cheval-heure}}$$

$$\rho_g = \frac{634 \times P_j}{C \times \frac{V}{100} \times P_i}$$

où :

$P_j$ puissance nécessaire à la jante pour la vitesse d'essai en cheval-vapeur (lire sur la courbe de l'utilisation);

C consommation en litres aux 100 km;

V vitesse constante d'essais en kilomètres à l'heure;

$P_i$ pouvoir calorifique inférieur au litre du carburant (approximativement 7 500 cal pour une essence de densité 720).

A titre d'exemple, une petite voiture consommant 6 litres aux 100 km à 75 km/h en vitesse stabilisée demande 8,8 ch à la jante, son rendement global est de 16,5 %. Cette même voiture, à 110 km/h, consomme 8,6 litres aux 100 km pour une puissance à la jante de 22,5 ch ; son rendement est alors de 20 %.

On peut en déduire que si l'on se place strictement au point de vue de l'économie d'essence, il vaut mieux brûler 6 litres aux 100 km avec un rendement de 16,5 % que 8,6 litres aux 100 km avec un rendement de 20 %. Le facteur vitesse a donc plus d'importance sur la consommation que le facteur rendement global.

Problèmes posés aux constructeurs pour l'amélioration du rendement global de la voiture

Le constructeur peut agir :

1. En améliorant le rendement du moteur (nous examinerons ce point ci-dessous en détail puisque aussi bien il est en grande partie lié au carburant utilisé).

2. En améliorant le rendement de transmission entre moteur et jante.

Le gain possible est assez limité en ce qui concerne les transmissions mécaniques; il peut encore être amélioré en ce qui concerne les transmissions "fluides".

3. Par réduction de la puissance nécessaire à la jante pour une vitesse donnée.

Cette puissance dépend :

a) De la résistance au roulement (poids de la voiture, gonflage des pneus).

b) De la résistance de l'air

$$R = \frac{a}{2g} C_x S V^2$$

Le coefficient de pénétration $C_x$ est passé pratiquement de 1 à 0,3 en trente ans.

4. Par une adaptation soignée du moteur à la voiture (choix judicieux des démultiplications possibles en fonction de la consommation).

## Rendement du groupe moteur

Nous appelons le "groupe moteur" le moteur avec tous les accessoires qui lui sont attachés : par exemple, pompe à eau, ventilateur,

pompe à liquide de transmission, dynamo, etc. Tous ces accessoires absorbent une notable partie de la puissance du moteur.

Il est évident par exemple que l'adaptation d'un ventilateur débrayable constitue un progrès important dans la recherche du rendement : le ventilateur n'est utile que pendant environ 15 % de la vie de la voiture, pendant les 85 % restant il absorbe les chevaux et "brasse" de l'air en pure perte. Les gains réalisés en consommation par l'adaptation d'un ventilateur débrayable peuvent être de l'ordre de 5 à 6 % de la consommation de la voiture.

Le rendement mécanique global du groupe moteur diminue avec l'augmentation du régime, il augmente avec la température d'eau de refroidissement.

## Rendement du moteur nu. Bilan thermique

S'il s'agit du moteur seul, on peut estimer très approximativement que le bilan en utilisation s'établit ainsi, sur 100 calories apportées au moteur par le carburant :

- 20 sont effectivement transformées en puissance effective;
- 40 sont dissipées par l'eau ou l'air de refroidissement;
- 30 sont dissipées dans les gaz d'échappement;
- 10 sont dissipées en pertes diverses (conductibilité, convexion, pertes dans l'huile, etc.).

Les chiffres ci-dessus ne constituent que des ordres de grandeur, il est évident par exemple que lors d'un essai de puissance et consommation au banc, le rendement en puissance effective est supérieur à 20 %. Il s'agit d'un rendement moyen en utilisation, tenant compte des charges réduites.

Ce chiffre de 20 % est faible et depuis vingt ans toutes les recherches des constructeurs de moteurs tendent vers son amélioration.

## Voies possibles dans l'amélioration du rendement d'un moteur

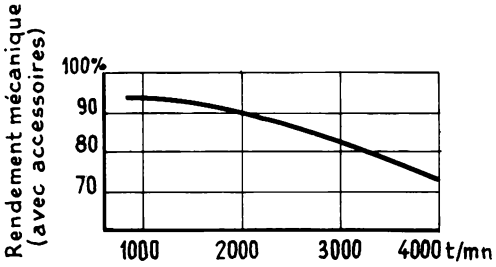
Le rendement global :

$$\rho_b = \rho_o \times \rho_c \times \rho_t$$

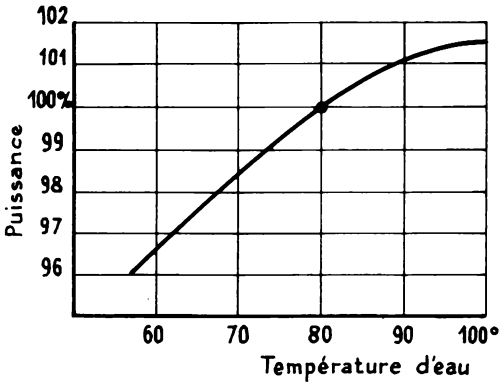
$\rho_o$ étant le rendement organique ou mécanique

$\rho_c$ étant le rendement de cycle

$\rho_t$ étant le rendement thermodynamique




Variation du rendement mécanique en fonction du régime




Variation de la puissance en fonction de la température d'eau de refroidissement

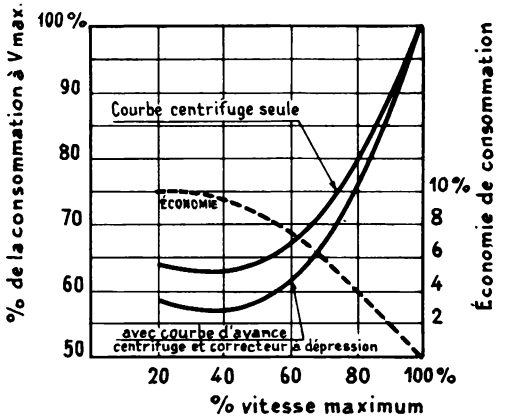
Signalons enfin l'importance de l'allumage dans le rendement du moteur.

L'allumage intervient de deux manières :

a) Par sa qualité (l'énergie dans l'étincelle). Il n'est que de mettre des bougies neuves sur un moteur sans rien changer d'autre pour constater immédiatement une réduction de consommation notable.

b) Par son calage (loi d'avance en fonction du régime de la dépression, conservation de cette loi dans le temps).

Nous examinerons successivement chacune de ces trois voies possibles de progrès dans la recherche de l'amélioration du rendement global du moteur nu.




Influence du correcteur d'avance à dépression sur la consommation

I. Rendement organique ou mécanique. - Nous avons déjà vu que ce rendement diminue quand le régime augmente, il diminue aussi quand la pression maxima augmente. Cette diminution constitue une des causes de la limitation des taux de compression. La grosse part des pertes de rendement mécanique est imputable aux pièces en mouvements alternatifs, pistons principalement; une bonne adaptation pistons-chemises, et une usure faible permet une bonne

conservation du rendement dans le temps. Des progrès notables ont été faits dans ce sens pendant les dernières années.

L'apparition sur le marché d'huiles dites "multigrade" fluides et à bon index de viscosité en diminuant les frottements aux températures moyennes et basses a apporté aussi une large contribution à l'amélioration du rendement mécanique.

On peut penser que des études plus poussées sur les états de surface et le perfectionnement constant de la rigidité des machines-outils amèneront encore quelques gains dans cette voie de la diminution des frottements.

II. Rendement de cycle. - Ce rendement est en quelque sorte le rapport de la surface du diagramme pratique à celle du diagramme théorique. Il dépend de l'architecture même du moteur, de son dessin, de la forme de la culasse, des dimensions et levées de soupapes, du dessin de l'arbre à cames, du croisement des soupapes, etc. et plus généralement du remplissage et, ce qu'on oublie souvent, de la bonne évacuation des gaz brûlés après combustion.

Le carburant intervient dans ce rendement en ce qui concerne le rendement de combustion et le remplissage. Nous avons étudié précédemment cette influence du carburant à propos des caractéristiques volatilité et chaleur de vaporisation. La composition chimique ou rapport carbone/hydrogène n'intervenant qu'assez peu.

III. Rendement thermodynamique. - Il résulte des lois de transformation de la chaleur en travail mécanique étudiées dans d'autres cours.

Rappelons seulement que le rendement thermodynamique du cycle à volume constant a pour expression :

$$\rho_t = 1 - \frac{1}{T^{(\gamma - 1)}}$$

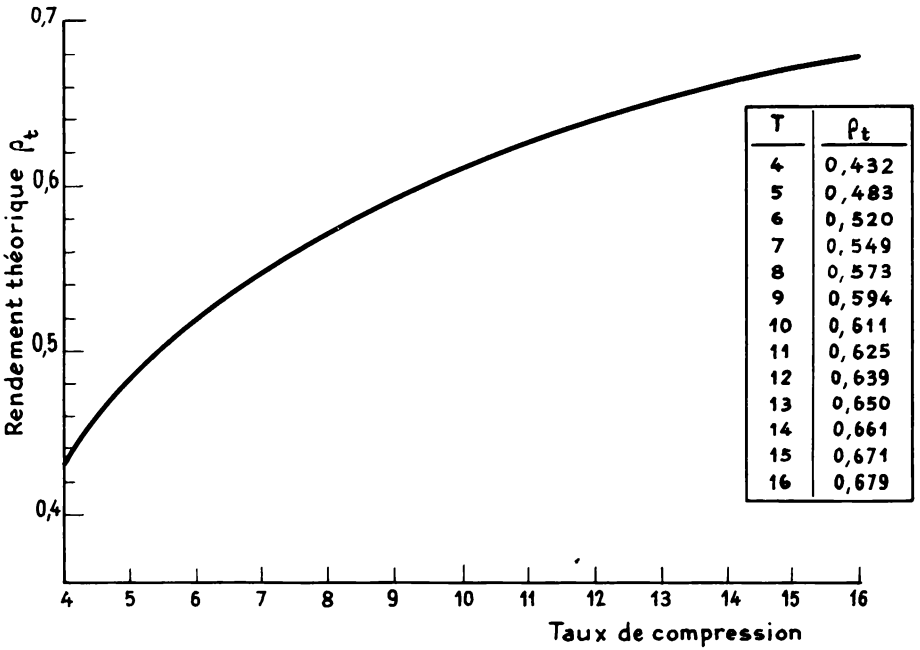
où $T$ est le taux de compression volumétrique et $\gamma$ le coefficient polytropique.

Si l'on veut augmenter $\rho_t$ il faut augmenter le taux de compression.

En résumé, l'expression :

$$\rho_b = \rho_o \times \rho_c \times \rho_t$$

nous montre que le but final d'augmenter $\rho_b$ peut être atteint par




Variations du rendement thermodynamique théorique
en fonction du taux de compression

trois voies différentes, mais parmi ces trois voies c'est en fait la dernière (augmentation de $\rho_t$) qui est la plus susceptible de gain substantiel. C'est pourquoi les constructeurs de moteurs tendent depuis longtemps à augmenter leur taux de compression. On peut se demander alors pourquoi cette augmentation est si lente (il a fallu 15 ans pour passer de 6,5 à 8 sur les moteurs de série). La réponse à cette question est que c'est le carburant qui limite le taux de compression admissible et en particulier ses qualités antidétonantes mesurées précisément par l'indice d'octane.

## Conclusion générale sur les questions de rendement

En conclusion, il existe plusieurs voies possibles dans la recherche de hauts rendements, une des plus profitables de ces voies est celle de l'augmentation du taux de compression du moteur, mais on se heurte alors aux qualités antidétonantes du carburant mesurées par l'indice d'octane.

On voit par là comment le progrès du moteur est lié intimement au progrès des carburants.

Cette situation a engendré une sorte de "course à l'octane" : tantôt les taux de compression adoptés par les constructeurs sont en avance sur l'indice d'octane du carburant distribué, tantôt c'est le contraire qui se produit. Ce simple fait justifie d'ailleurs la distribution de deux carburants, un ordinaire et un super d'indice d'octane supérieur, ce dernier plus particulièrement destiné aux moteurs de fabrication récente à plus haut rendement.

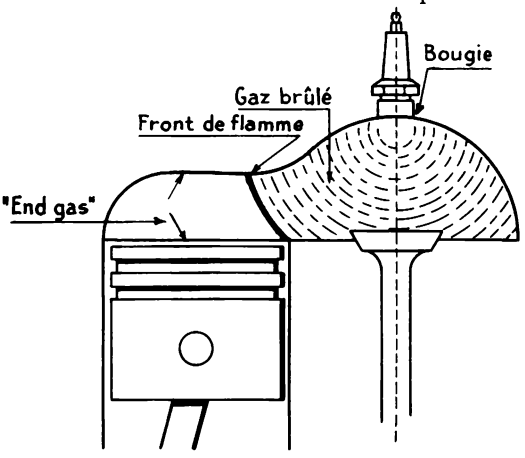
La course à l'octane détermine toute la politique pétrolière actuelle, les raffineurs étant dans l'obligation de changer périodiquement leurs installations dans le but d'augmenter les indices d'octane des carburants distribués. Ces installations, qui coûtent très chères, doivent être amorties rapidement.

## Limite constituée par la valeur antidétonante du carburant : la détonation

Cette limite est constituée par la détonation et toutes ses conséquences thermiques et mécaniques. Qu'est-ce donc que la détonation ?

### Mécanisme de la détonation

Ce sujet est traité complètement dans d'autres cours. Nous nous bornerons à en donner une explication très simplifiée :




Aussitôt après l'inflammation du mélange carburé par la bougie d'allumage, la combustion se propage par tranches successives à une vitesse relativement réduite de l'ordre d'une dizaine de mètres par seconde. Le front de flamme précédant les gaz déjà brûlés agit en quelque sorte comme un piston comprimant ceux non encore brûlés. Cette compression s'accompagne d'une augmentation de température. Quand cette température atteint celle d'auto-inflammation, tout le restant de la charge non encore brûlée prend feu simultanément et non plus progressivement. Cette combustion instantanée locale entraîne une montée en pression également locale extrêmement brusque et produit un choc analogue à un coup de marteau sur les organes du moteur, culasse et fond de piston. Ceux-ci entrent en vibrations (exactement comme une cloche sur laquelle on frappe) et rendent un bruit, ce bruit

à fréquence et tonalité élevées (qui dépend de l'épaisseur des parois) est le cliquetis. Il y a lieu de ne pas confondre ce "cliquetis" avec un bruit d'ordre mécanique (jeux d'axe de piston ou autres).

En dehors de l'effet mécanique de choc, la "détonation" provoque une élévation notable de la température dans la chambre de combustion, car le moteur est incapable d'évacuer instantanément l'afflux de calories libérées simultanément par l'"End gas".

L'explication donnée ci-dessus est destinée à bien faire comprendre le phénomène mais elle est un peu simpliste. En réalité, au phénomène physique de compression analysé ci-dessus vient se superposer un phénomène chimique qui réside en la formation de peroxydes instables pendant le temps de compression entre certaines limites de températures par contact entre les molécules d'oxygène et les molécules d'hydrocarbures. Ces peroxydes, dont la quantité est fonction de la nature chimique du carburant et qui se trouvent dans l'"End gas" ont pour effet d'abaisser la température d'auto-inflammation de celui-ci, donc d'accélérer la détonation. On comprend ainsi le rôle des antioxydants comme le plomb tétraéthyle qui, en limitant ou supprimant la formation de ces peroxydes, recule les limites de la détonation et augmente ainsi l'indice d'octane du carburant.

L'explication élémentaire donnée ci-dessus de la détonation se complique du fait de la turbulence, des interférences d'ondes de pression et d'autres phénomènes secondaires.

En résumé, la détonation a pour conséquence une augmentation locale et brusque de la pression en fin de combustion, accompagnée d'une augmentation de température.

Effets de la détonation

Ces effets sont de deux sortes, mécaniques et thermiques.

Effets mécaniques. - Ce sont ceux qui provoquent le bruit de cliquetis à haute tonalité, mais, en fait, ce sont les moins dangereux et les moteurs normaux de série sont parfaitement capables de supporter ces chocs purement locaux; nous n'en voulons pour preuve que le fait d'entendre certaines voitures à moteurs refroidis par air dont la capacité thermique est faible et qui "cliquettent" à longueur de journée sans en souffrir davantage.

Il n'en est pas de même sur les moteurs de compétitions à taux de compression très élevés (11 à 12) où l'effet mécanique de choc combiné à des surchauffes locales entraînent la formation de "piqûres"

sur le fond du piston, celui-ci pouvant même être quelquefois complètement percé. Les pressions locales peuvent atteindre dans ce cas 100 à 140 kg quoi qu'il soit difficile de les mesurer exactement.

L'action mécanique peut parfois être bienfaisante lorsqu'elle n'est pas exagérée en facilitant par "piquage" l'évacuation des calamines dures adhérentes dans la chambre de combustion.

Effets thermiques. - Ce sont les plus dangereux et ce sont leurs conséquences directes qui sont l'auto-allumage et surtout le pré-allumage qui constituent la vraie limite à l'augmentation du taux de compression pour un carburant d'indice d'octane donné.

Nous avons vu que le moteur était incapable d'évacuer les calories libérées instantanément dans l'"End gas". Il y a donc échauffement, mais cet échauffement étant lui-même favorable à la détonation, il s'ensuit une rupture d'équilibre thermique. A partir d'une certaine intensité de détonation, le moteur chauffe, la détonation s'amplifie alors et le moteur chauffe encore davantage, etc. jusqu'au pré-allumage (allumage avant l'étincelle) qui, en s'accentuant, provoque d'abord une réduction de puissance puis le calage. C'est là la vraie limite de compression pour un carburant donné.

## Influence du taux de compression, du remplissage et de l'alésage sur la détonation

Les températures et pressions augmentent avec le taux de compression. Ces deux facteurs sont favorables à la détonation, donc, pour un carburant donné, la détonation augmente avec le taux de compression.

Indiquons néanmoins que la détonation n'est pas uniquement fonction du taux de compression, mais bien de la pression de fin de compression, c'est-à-dire que le remplissage intervient. Ceci explique qu'on pourra, pour un même carburant, admettre un taux de compression plus élevé si le remplissage est freiné (cas des voitures américaines).

Indiquons aussi que les moteurs à gros alésage supportent pour un même carburant un taux de compression moindre à cause de leurs températures de compression et de combustion plus élevées (rapport surface/volume du cylindre plus faible).

### Influence de l'avance à l'allumage sur la détonation

Le piston continuant à monter, après le début de la combustion, les pressions et températures de l'"End gas" sont relevées et le cliquetis apparaît lorsqu'on augmente l'avance à l'allumage. Nous étudierons ci-après plus en détail les relations avance à l'allumage et "cliquetis".

### Influence du dessin de la culasse sur la détonation

L'étude complète de cette influence de la forme et du refroidissement de la culasse sur la détonation nécessiterait de longs développements, nous nous bornerons donc à en indiquer quelques principes de base :

a) La longueur du trajet de la flamme, depuis la bougie jusqu'au point le plus éloigné de la chambre de combustion, doit être réduite.

b) La température moyenne des parois de la chambre de combustion et plus particulièrement la température des parois les plus éloignées de la bougie doit être réduite.

Le premier de ces deux principes implique une chambre compacte hémisphérique, le second implique un décalage de la bougie vers la soupape d'échappement qui, étant une partie chaude, doit être rapprochée pour diminuer le trajet de la flamme.

c) La turbulence a aussi tendance à reculer l'apparition de la détonation, à accélérer la combustion, à réduire la température des soupapes d'échappement et à faciliter l'évacuation des gaz brûlés résiduels, à la condition toutefois qu'elle ne soit pas excessive; une trop grande vitesse de combustion faisant apparaître le "cognement", le moteur devenant "dur".

Les progrès sur les formes de culasses pendant ces quelques dernières années ont permis d'accroître nettement les taux de compression admissibles pour un carburant d'indice d'octane donné.

## L'INDICE D'OCTANE. DEFINITION

Après ce long préambule nécessaire sur les questions de rendement et de détonation, nous pouvons maintenant passer plus précisément à la caractéristique octane du carburant.

L'indice d'octane mesure la plus ou moins grande aptitude

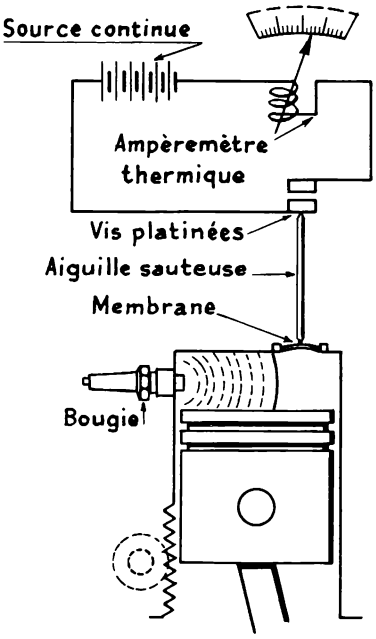
d'un carburant à détoner ou, ce qui revient au même, sa plus ou moins grande aptitude à supporter la compression.

Cette caractéristique dépend au premier chef de la composition chimique du combustible et de sa "stabilité thermique", donc du mode de traitement du brut dont nous disposons. La mesure de cette caractéristique n'a rien d'absolu. Elle réside en la comparaison du carburant à essayer à un mélange de deux hydrocarbures purs étalons : l'isooctane d'une part, qui ne détone pas ou peu, et l'heptane, d'autre part, qui détone beaucoup. Le mélange de ces deux combustibles couvre à peu près toute l'échelle de détonation des combustibles courants.

On dit, par exemple, qu'un carburant a un indice d'octane de 80 quand il est analogue, au point de vue de la détonation, à celui d'un mélange de 80 % d'isooctane et de 20 % d'heptane normal.

Il reste maintenant à expliquer comment on fait ressortir cette "analogie" de détonation.

Nous avons vu ci-dessus que la détonation se traduisait par une augmentation brusque de pression. Il existe des appareils qui peuvent enregistrer et chiffrer d'une manière précise et reproductible ces pressions. Si l'on monte ces appareils sur un moteur dont les conditions de fonctionnement sont parfaitement déterminées et toujours les mêmes, en essayant sur ce moteur différents mélanges d'isooctane et d'heptane, on arrivera à trouver celui qui donne la même indication de détonation que le combustible à essayer.



Détection de la détonation sur le C.F.R.

Ce moteur est le moteur C.F.R., dont l'agencement est tel qu'il réduit au minimum le nombre des essais.

### Principe de la mesure sur le moteur C.F.R. Détection de la détonation

Nous n'exposerons pas ici la méthode de mesure de l'indice d'octane sur le moteur C.F.R. Qu'il nous suffise de dire que, dans ce moteur,

nous pouvons contrôler avec précision tous les facteurs qui peuvent influencer la détonation : richesse et température du mélange, avance à l'allumage, compression, régime, etc., donc faire en sorte que les essais soient reproductibles.

Nous nous contenterons de rappeler succinctement le mécanisme de détection de la détonation sur le C.F.R. (voir fig. p. 89).

Une "aiguille sauteuse" repose sur une membrane dont l'épaisseur est telle qu'elle réagit seulement à l'augmentation de pression brutale du régime détonant, mais reste insensible pendant la combustion normale.

L'aiguille, en "rebondissant" ferme un circuit électrique. Le temps de contact des vis platinées est d'autant plus long que la détonation est plus violente; par conséquent, la quantité d'électricité libérée dans l'ampèremètre thermique et, par conséquent, la déviation de l'aiguille, seront d'autant plus fortes que la détonation sera plus violente.

Le mode de détection ci-dessus dit de la "boucing pin" est remplacé maintenant par un système de détection et d'amplification électronique dit "detonation meter" destiné à augmenter la précision de la mesure et les commodités d'utilisation.

Le principe de la mesure consiste donc à rechercher quel est, pour un même taux de compression du C.F.R., le mélange heptane-isooctane qui donne la même déviation que le carburant x dont on veut mesurer l'indice d'octane.

Les conditions de fonctionnement et les réglages du moteur ont été choisis de telle manière que le classement des carburants par valeur antidétonante sur ce moteur coïncide le mieux possible avec le classement enregistré sur les voitures automobiles.

Nous donnons ci-après le tableau de ces conditions d'essais pour les différentes méthodes de mesure utilisées actuellement pour l'automobile et l'aviation. Nous reviendrons plus loin sur la comparaison et l'utilisation de ces différentes méthodes, mais insistons dès maintenant sur la "relativité" et le caractère empirique de la mesure. Les conditions de cette mesure devront changer et suivre l'évolution de la construction des moteurs.

Remarque importante concernant l'indice d'octane

L'indice d'octane n'est pas un critère de qualité du carburant.

On ne peut pas dire, par exemple, qu'un carburant à 80 d'octane soit meilleur qu'un à 60. Il sera seulement meilleur au point de vue de la détonation, mais au point de vue de la consommation, la puissance, les reprises, etc., il pourra être inférieur.

Cette remarque est illustrée, par exemple par l'alcool carburant dont l'indice d'octane est de 104, c'est-à-dire encore plus antidétonant que l'isooctane pur et dont l'usage, dans les moteurs ordinaires, se révèle plus mauvais au point de vue de la consommation, les reprises, la puissance, etc. que n'importe quelle essence à nombre d'octane inférieur.

Conditions de fonctionnement du C.F.R.
pour les différentes méthodes de mesure de l'indice d'octane

| | $F_1$ Research method | $F_2$ Motor method | $F_3$, 1C ou aviation mélange pauvre | $F_4$, 3C ou aviation mélange riche |
|---|---|---|---|---|
| Régime en tr/mn... | 600 ± 6 | 900 ± 9 | 1 200 ± 12 | 1 800 ± 45 |
| Qualité d'huile S.A.E. | 30 | 30 | 50 | 50 |
| Température d'huile carter ..... | 58 ± 8°C | 58 ± 8°C | 66 ± 5°C | 74 ± 2°C |
| Température liquide refroidissement.. | 100 ± 2°C | 100 ± 2°C | 190 ± 5°C | 190 ± 5°C |
| Humidité de l'air en grammes par kilogramme ..... | 3,5 à 7 | 3,5 à 7 | 3,5 à 7 | 9,9 max |
| Température du mélange carburé ... | 149 ± 2°C | | 104 ± 2°C | |
| Ecartement bougies | 0,5 mm | 0,5 mm | 0,5 mm | 0,5 mm |
| Ecartement vis platinées rupteur ... | 0,5 mm | 0,5 mm | 0,5 mm | 0,4 mm |
| Richesse du mélange | pour knock max | pour knock max | pour max de temp. | variable |

## INFLUENCE DE L'INDICE D'OCTANE SUR LE FONCTIONNEMENT D'UN MOTEUR D'AUTOMOBILE EN SERVICE

### a) Indice d'octane insuffisant

Si l'indice d'octane du carburant est insuffisant, le moteur détone et nous avons vu que cela se traduisait par un bruit particulier à haute tonalité appelé "cliquetis". Si le cliquetis n'est pas trop accentué, il faut bien constater qu'en dehors du désagrément dû au bruit, le moteur ne se porte pas plus mal; la puissance ne diminue pas sensiblement et il n'y a guère que les reprises aux basses allures qui soient affectées et qui nécessitent le passage à une plus forte démultiplication, d'où augmentation de la consommation moyenne.

Si le cliquetis est assez accentué, le moteur chauffe, ce qui augmente encore la tendance à détoner et provoque l'auto-allumage.

#### Auto-allumage et pré-allumage par point chaud

Si, pour une cause quelconque (manque d'eau, courroie de ventilateur cassée, cliquetis exagéré, etc.), le moteur chauffe anormalement, les particules de carbone adhérentes aux parois de la chambre de combustion, ou l'électrode centrale de la bougie d'allumage, toujours assez mal refroidie et qui constitue une des parties les plus chaudes de la chambre, restent à l'incandescence et provoquent un allumage prématuré au cycle suivant, allumage intempestif qui n'est plus réglé dans le temps. Ceci se traduit toujours par une baisse de puissance pouvant aller jusqu'au calage dans les cas extrêmes.

On peut s'apercevoir de l'auto-allumage, par exemple, en coupant le contact après une longue course moteur très chaud, le moteur continue à tourner se comportant alors comme un semi-diesel.

### b) Indice d'octane surabondant

Nous avons déjà vu que l'emploi d'un carburant à 80 d'octane dans un moteur construit pour fonctionner avec du 70, n'amenait aucun gain ni de puissance, ni de consommation. Les gains constatés avec les supercarburants sur des voitures d'ancien modèle tiennent, non pas à la caractéristique "octane" du carburant, mais à la façon dont cet indice a été obtenu (cas essence-benzol) ou à d'autres propriétés des constituants (volatilité, pouvoir calorifique, etc.).

# INFLUENCE DE L'INDICE D'OCTANE SUR L'ETUDE D'UN MOTEUR D'AUTOMOBILE

Quand un constructeur étudie un nouveau modèle de moteur, il doit se préoccuper de l'indice d'octane du carburant disponible sur le marché. De la connaissance de cet indice dépendent le taux de compression du moteur et le dimensionnement des organes. Ces facteurs ont une influence décisive sur les performances possibles, aussi bien puissance que consommation. Enfin, la loi d'avance à l'allumage devra être étudiée en fonction de l'indice d'octane du carburant.

## Choix du taux de compression

Le choix du taux de compression en fonction de l'indice d'octane du carburant disponible sur le marché dépend :

1. De la cylindrée unitaire

Les échanges thermiques sont conditionnés par le rapport S/V de la surface des parois au volume de la charge. Les moteurs européens sont mieux placés que les moteurs américains du fait de leur plus faible cylindrée unitaire.

2. De l'alésage du moteur

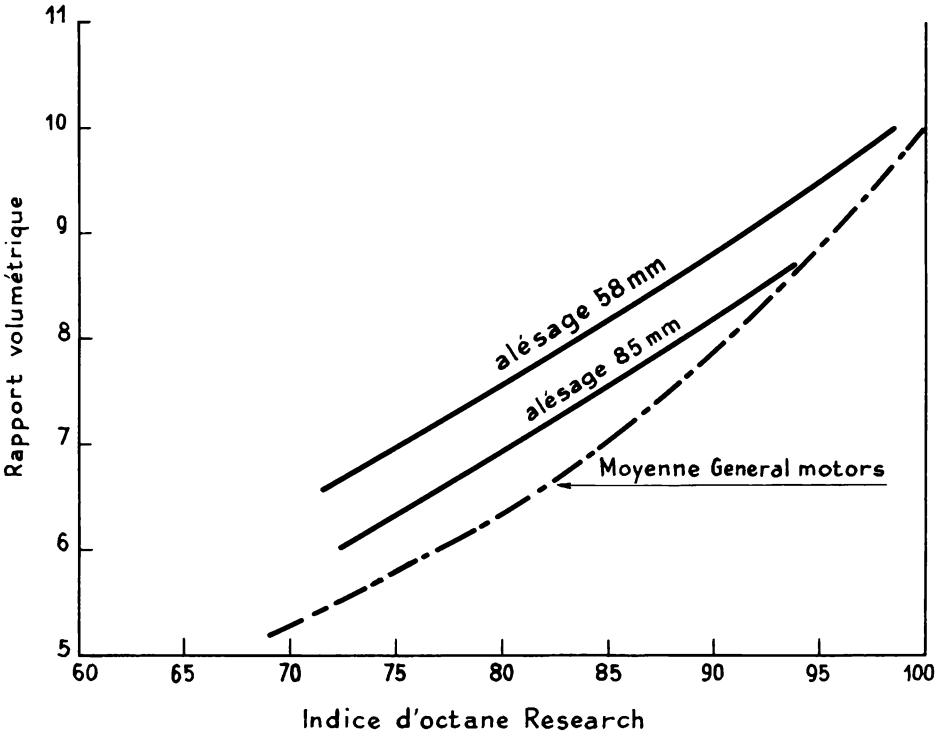
La figure ci-après, établie à partir d'un certain nombre de moteurs récents, indique approximativement les rapports de compression admissibles en fonction de l'indice d'octane Research du carburant pour des alésages différents. Ces courbes ne sont qu'approximatives et le dessin de la tubulure d'admission qui conditionne le "remplissage" peut aussi modifier leur position.

Ces courbes ne sont valables que pour 1958-1959, et les nouveaux progrès dans les dessins de culasse notamment sont susceptibles de leur faire subir une translation vers le haut.

Remarque I :

Il résulte d'études statistiques que la moyenne des alésages des voitures américaines est de 84 mm, alors que l'alésage moyen français est de 66 mm, cet alésage moyen tendant à diminuer par suite du développement du marché des voitures de petites cylindrées.

Il s'en suit que ces dernières peuvent atteindre un taux de compression plus élevé avec le même carburant ou encore qu'elles peuvent prétendre au même taux de compression et au même rendement avec un carburant inférieur en indice d'octane et ceci même compte tenu du meilleur remplissage obligatoire des voitures françaises.

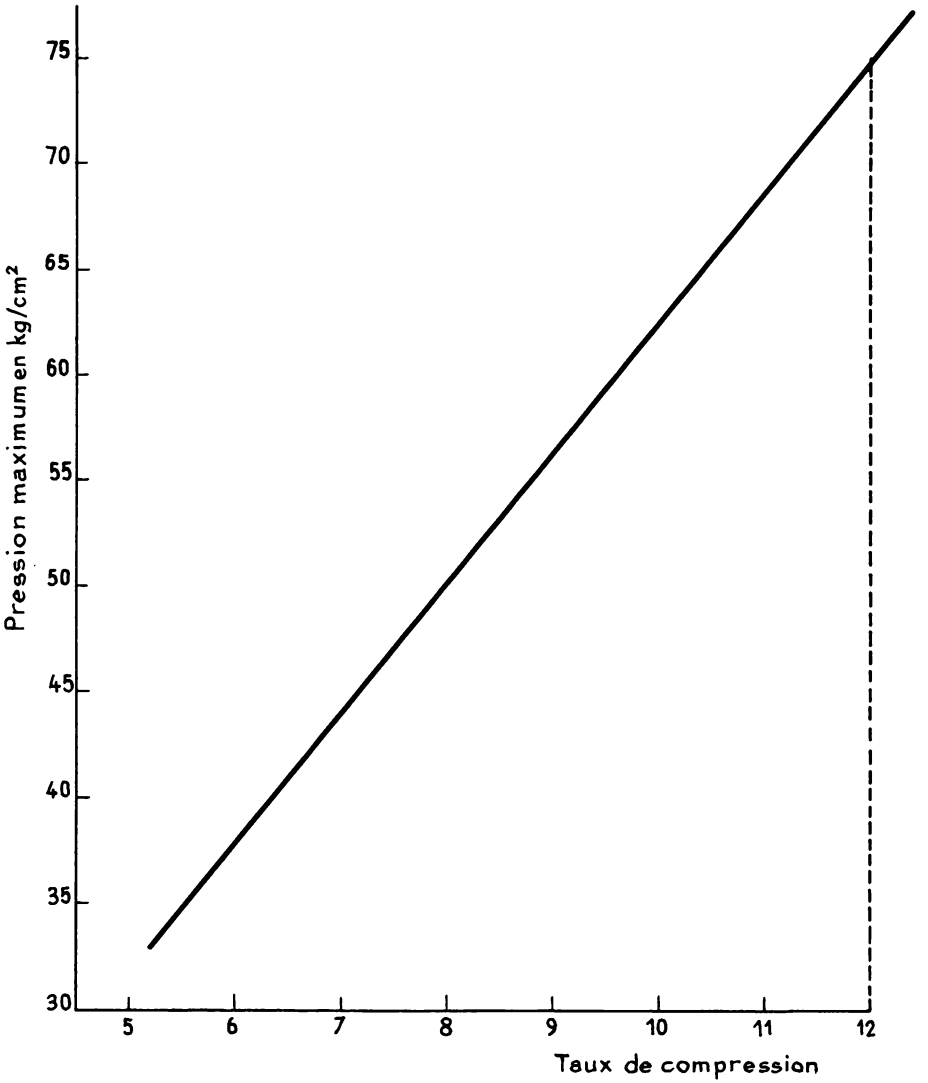



Remarque II :

Dans le choix du taux de compression de son moteur, en fonction de l'indice d'octane du carburant, le constructeur devra tenir compte également de l'augmentation rapide des pressions maxima supportées par le piston. C'est cette pression qui,en dernière analyse,lui servira de base pour ses calculs d'organes et conditionnera notamment les dimensions des paliers et du vilebrequin pour avoir une rigidité suffisante.

Nous donnons ci-après la courbe approximative des pressions maxima du cycle en fonction du taux de compression pour un bon remplissage.

C'est ainsi par exemple que,pour un moteur d'alésage 60 mm et 10 de taux de compression, la pression supportée par le piston est de 1,75 t. L'inertie des masses en mouvement alternatif ne compense pas cette pression surtout dans les régimes réduits, ceci explique la "dureté" de marche des moteurs à taux de compression élevé et leur inaptitude à descendre en régime. Les conditions de rigidité du vilebrequin deviennent alors primordiales et il peut être nécessaire d'adopter des moteurs à cinq paliers au lieu de trois.

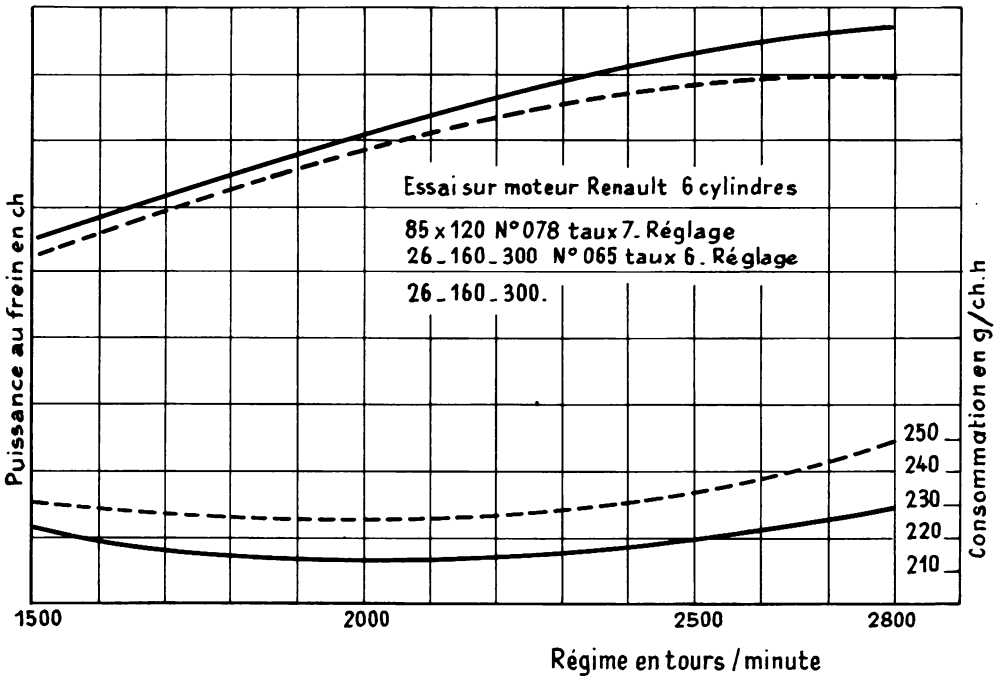



L'indice d'octane et la performance

Lorsqu'en absence de toute détonation nous augmentons le rapport de compression du moteur, nous améliorons en même temps la puissance et la consommation, et cela à peu près proportionnellement à l'augmentation de rendement théorique du cycle à air.

Le gain est normalement plus élevé dans les charges partielles qu'à pleine admission et c'est là un heureux effet de l'augmentation du taux de compression.

Il est à noter que le constructeur pourra transformer le gain de puissance donné par augmentation du taux de compression intégralement en gain de consommation, s'il estime les performances de sa voiture suffisantes, ceci par modification de l'admission et de la carburation.




Puissance et consommation en fonction du taux de compression

## Incidence de l'augmentation du taux de compression sur les températures de fonctionnement du moteur

Contrairement à une opinion généralement répandue, l'augmentation du taux de compression diminue les fatigues thermiques du moteur.

C'est ainsi par exemple que, si nous admettons que le passage d'un taux de 7 à 9 permet d'utiliser en puissance effective 27 au lieu de 22 calories sur 100, on n'aura plus à évacuer dans le second cas que 73 au lieu de 78, et ceci dans les mêmes conditions de refroidissement.

Nous diminuons donc le gaspillage de chaleur qui est la source de la plupart des troubles de fonctionnement du moteur, et notamment le "grillage" des soupapes d'échappement.

L'augmentation du taux de compression entraîne il est vrai une légère augmentation de la température instantanée de la flamme, mais la détente plus prolongée abaisse notablement la température d'échappement, la température moyenne du cycle étant diminuée.

L'opinion fausse de la fatigue plus élevée des moteurs très comprimés est basée sur l'expérience des moteurs de compétition. Mais il faut remarquer que sur ceux-ci les échauffements sont le plus souvent dus à l'auto-allumage par les bougies, et que les incidents assez fréquents de soupapes sont dus au fait que l'on demande à celles-ci d'évacuer à peu près trois fois plus de chaleur que pour un moteur normal.

C'est seulement en employant un rapport de compression élevé sur les moteurs de compétition que l'on peut faire tenir les soupapes d'échappement. Si on pouvait faire tourner à régime élevé un moteur de course à basse compression, il "grillerait" toutes ses soupapes au premier tour de piste.

## Limitation à l'augmentation des taux de compression. Course à l'octane

Il semblerait résulter de tout ce que nous venons d'étudier qu'on a toujours intérêt à augmenter les taux de compression du moteur, à la condition évidemment que l'indice d'octane du carburant précède le mouvement, c'est la "course à l'octane".

Nous allons voir qu'il n'en est pas ainsi et que cette course a une limite, cette limite devant tenir compte de considérations d'ordre technique et d'ordre économique.

Cette limite "compression-octane" n'est d'ailleurs pas la même pour la construction américaine et pour la construction française qui sont essentiellement différentes par les cylindrées, par les alésages, par le poids, par le nombre de cylindres, par les modes de transmission, etc. et, plus généralement, par les exigences du client américain comparées à celles du client français.

Ces situations essentiellement différentes montrent le danger qu'il y aurait à copier servilement notre politique française "moteurs-carburants", sur la politique américaine.

### Conditions techniques de limitation du taux de compression

1. Difficultés de dessin et de construction : les constructeurs ont

de grosses difficultés à réaliser des formes de chambre de combustion bien étudiées, quand l'espace mort diminue, et qu'il s'agit de loger dans une chambre réduite soupapes et bougies.

Cette diminution donne aussi une importance croissante aux tolérances de fabrication dont l'importance relative grandit jusqu'à devenir inadmissible.

Ces difficultés sont très amplifiées sur les voitures françaises de petite cylindrée par rapport à la construction américaine.

2. Les pressions maxima augmentent rapidement avec le taux de compression, d'où nécessité d'attelages plus rigides, donc plus lourds.

3. Les organes de démarrage (démarreur - batterie) doivent être prévus plus puissants pour pouvoir passer la pression de compression et ceci n'est pas sans coûter beaucoup plus cher. Corrélativement, la dynamo doit être prévue plus puissante, donc consommant plus d'essence.

4. Les problèmes d'allumage et de bougies deviennent beaucoup plus difficiles à résoudre quand les pressions augmentent.

5. Enfin, et ceci peut être le plus grave, le fonctionnement d'un moteur à haute compression devient "rude", ce qui n'est pas sans affecter la souplesse et le bruit qui sont des facteurs importants du confort.

Le problème de la rigidité du vilebrequin, avec l'augmentation des pressions maxima, conduira probablement à l'adoption de 5 paliers au lieu de 3 sur nos moteurs français, d'où moteurs plus encombrants et plus chers.

Tous ces problèmes de rigidité et de souplesse se posent avec bien moins d'acuité sur les huit cylindres américains que sur les quatre cylindres français.

Enfin, et même en supposant que tous ces problèmes techniques posés par l'utilisation de taux de compression élevés puissent être résolus, il resterait à voir si cette solution se justifie économiquement.

Conditions économiques de limitation du taux de compression

La "course à l'octane" est loin d'être considérée comme avantageuse : le point d'octane coûte très cher, la fabrication des essences à indice élevé suppose des investissements considérables en raffineries,

outre qu'elle menace de créer un déséquilibre dans la production des fuels et autres produits tirés du brut et dont le marché a besoin au même titre que l'essence.

Au point de vue général de l'économie du pays, on peut se demander si la "course à l'octane" est payante : le gain de puissance disponible par augmentation de l'octane est surtout utilisé pour augmenter les performances des voitures, notamment les vitesses.

Il est indéniable que sur nos routes les vitesses moyennes et maxima croissent nettement d'année en année, et l'on sait que la vitesse coûte très cher en consommation. La vitesse est incontestablement un signe de progrès... contre lequel on ne peut aller; mais on ne peut tout de même s'empêcher de remarquer qu'une bonne partie du gain de consommation résultant de l'augmentation des rendements ne sert qu'à "brasser de l'air".

Enfin, l'avenir même de l'indice d'octane est incertain, étant à la merci de la mise au point d'un nouveau moteur indifférent à cette caractéristique, au même titre que les essences aviation à hauts indices d'octane en voie d'être détrônées par le vulgaire "kérosène".

... Mais ceci est du domaine des conjonctures.

## Taux de compression et indice d'octane futurs

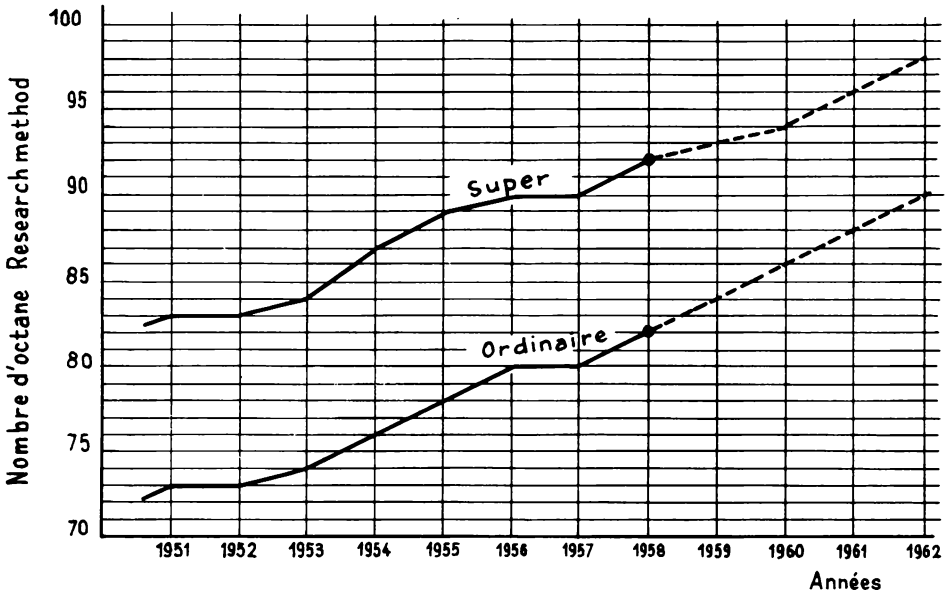
Il peut paraître prétentieux de préjuger de l'avenir, et les opinions sont assez divergentes sur ce que seront dans l'avenir les compressions et les indices d'octane. Ces divergences sont d'ailleurs assez naturelles, étant donné les différences profondes de conception de la construction automobile, par exemple aux Etats-Unis et en France.

C'est ainsi que les constructeurs américains envisagent déjà des taux de compression de 12,5 nécessitant des indices de 120, il est vrai que ceci s'applique à des moteurs de fortes cylindrées et à des puissances telles que les moteurs ne peuvent être utilisés qu'aux charges partielles.

En France, où la cylindrée moyenne de nos moteurs diminue et où le facteur de charge est beaucoup plus élevé, nous pensons que le plafond du taux de compression doit se situer aux environs de 10, nécessitant un carburant de 98 à 100 octane Research. On peut penser d'ailleurs, et c'est le sens des progrès actuels, que ce taux de 10 pourrait être atteint avec 96-98 d'octane, ceci sous la réserve que l'architecture de nos moteurs reste en gros ce qu'elle est actuellement.

Nous pensons aussi que, même en France, la "course à l'octane" se continuera même au-delà de 100, mais ceci pour des considérations d'ordre commercial et de concurrence entre raffineurs.

Nous donnons ci-dessous la prévision des indices d'octane Research en France jusqu'en 1961. Cette courbe n'est évidemment valable qu'en cas de continuation de la politique actuelle de la Direction des carburants. Il est néanmoins possible que la mise en application du Marché commun européen accentue la progression.




Prévision de l'évolution du nombre d'octane
(Research method) jusqu'en 1961

Remarque sur les taux de compression des moteurs de compétition

La compétition nous donne des indications utiles relativement aux taux de compression limites futurs de nos voitures françaises.

Il est intéressant de constater en effet que sur les moteurs de courses les taux de compression n'ont que très peu varié depuis dix ans, ils plafonnent entre 10 et 11,5, et toutes tentatives pour les augmenter a conduit à des déboires. Or ces moteurs sont impensables pour la construction de série à cause de leur manque de souplesse; on peut donc penser que les taux des voitures de série resteront légèrement en deça.

## L'INDICE D'OCTANE DES CARBURANTS AVIATION POUR MOTEURS A PISTONS

Ce chapitre relatif aux carburants aviation pour moteurs à pistons a tendance à perdre de son intérêt étant donné la disparition progressive de ce genre de moteurs et leur remplacement par des turbines. Le dernier moteur à pistons a été livré à l'armée américaine début 1958; aucun appareil à pistons ne sera livré aux compagnies de navigation du monde entier en 1959.

Il n'en est pas moins vrai que le moteur à pistons a encore quelques années à vivre et même qu'il ne disparaîtra pas complètement.

Nous consacrons un chapitre spécial aux carburants pour turbines où la caractéristique octane a complètement disparu, en attendant que ceux-ci perdent aussi de leur intérêt et soient remplacés par des carburants et combustibles pour fusées.

Nous nous devons dans ce cours de faire le point des longues études qui ont abouti à la stagnation actuelle des carburants pour moteurs à pistons.

## INFLUENCE DE L'INDICE D'OCTANE DU CARBURANT SUR LE FONCTIONNEMENT D'UN MOTEUR D'AVION EN SERVICE

Si, dans le cas du moteur d'auto, le fonctionnement avec un carburant d'indice d'octane insuffisant est possible et n'entraîne pas tellement de catastrophes autres qu'une conduite bruyante et désagréable et un échauffement dont on s'apercevra rapidement, il n'en est pas de même dans un moteur d'avion où la détonation ne peut être facilement décelée en raison du bruit et où l'on ne peut tolérer la moindre cause d'échauffement sans entraîner presque immédiatement des accidents graves et l'arrêt du moteur.

Le moteur d'aviation, étant donné les puissances unitaires qu'on lui fait développer, a en effet bien du mal à évacuer, par l'air de refroidissement, les 40 % des calories de l'essence qu'il absorbe.

C'est ainsi qu'un moteur d'avion,développant 1 000 ch , doit en évacuer 1 500 à 2 000 sous forme d'énergie calorifique par les ailettes de refroidissement, et le gros problème de l'augmentation des puissances des moteurs d'avion tient à cette difficulté d'évacuation. Les moteurs d'avion sont donc tangents en ce qui concerne leur température de fonctionnement et l'on conçoit que toute cause nouvelle comme la détonation, entraînant encore une augmentation de la température, doit être prohibée.

## INFLUENCE DE L'INDICE D'OCTANE SUR L'ETUDE D'UN MOTEUR D'AVION

Plus encore que pour l'automobile, la connaissance de l'indice d'octane du carburant est indispensable au constructeur de moteurs d'avions. Il détermine, en effet, non seulement le taux de compression, mais encore le taux de suralimentation, c'est-à-dire tout le dessin du moteur et de son compresseur, les performances de l'avion, sa consommation, son aptitude au décollage, etc.

### L'indice d'octane en relation avec la compression et la suralimentation

Pour l'automobile, sauf en ce qui concerne les moteurs de course, on ne recherche pas les puissances spécifiques élevées; le poids par cheval a moins d'importance, la consommation et la souplesse du moteur restent les facteurs principaux.

En aviation, au contraire, la construction est orientée vers l'augmentation des puissances spécifiques. Cette augmentation peut se faire par deux moyens : la compression et la suralimentation.

Dans les deux cas, on est toujours limité par la détonation, mais à pouvoir antidétonant et à pression maxima équivalents, la suralimentation permet un gain de puissance beaucoup plus important que la compression seule. Cette propriété est mise en évidence dans les deux diagrammes suivants :

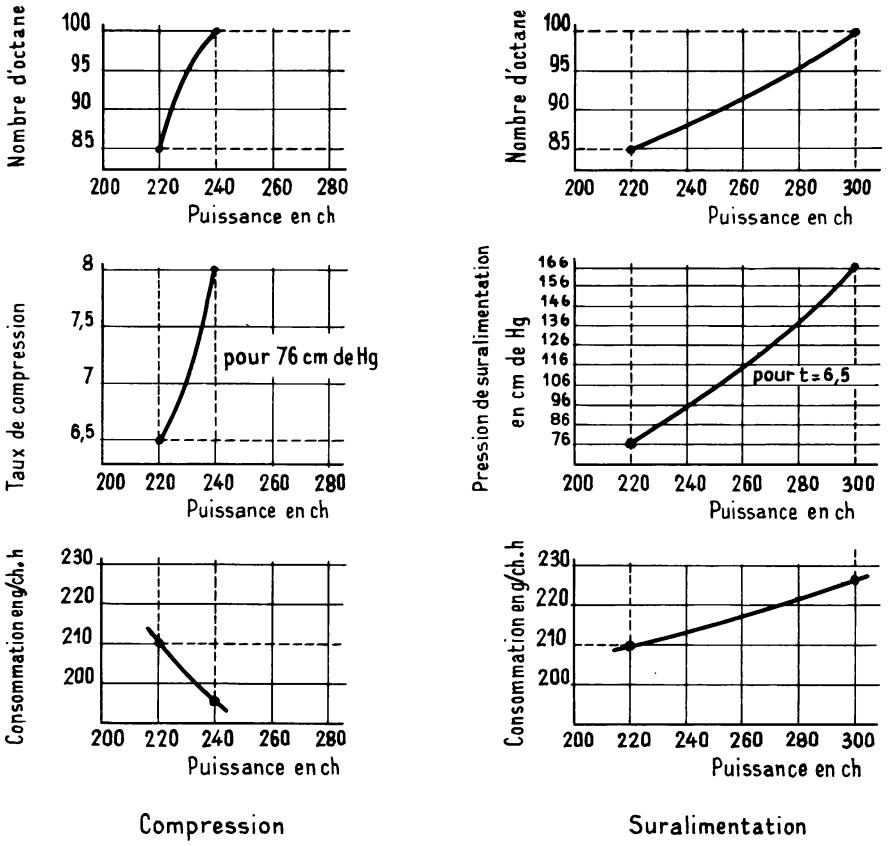
Le premier est relatif à un moteur d'essais de faible puissance et montre l'influence relative de la compression (à gauche) et de la suralimentation (à droite) :

L'emploi d'un combustible à 100 octane à la place d'un à 85 permet de passer de 220 à 240 ch en augmentant le taux de compression de 6,5 à 8, soit un gain de 20 ch.

Le même changement de combustible permet de passer de 220 à 300 ch en conservant le taux de compression de 6,5, mais en suralimentant à 116 cm de mercure, soit un gain de 80 ch.

L'action sur la compression seule fait baisser la consommation de 210 à 195 g au ch.h, celle sur la suralimentation la fait augmenter de 210 à 255 g.

Notons qu'il s'agit là d'un moteur entraînant un compresseur

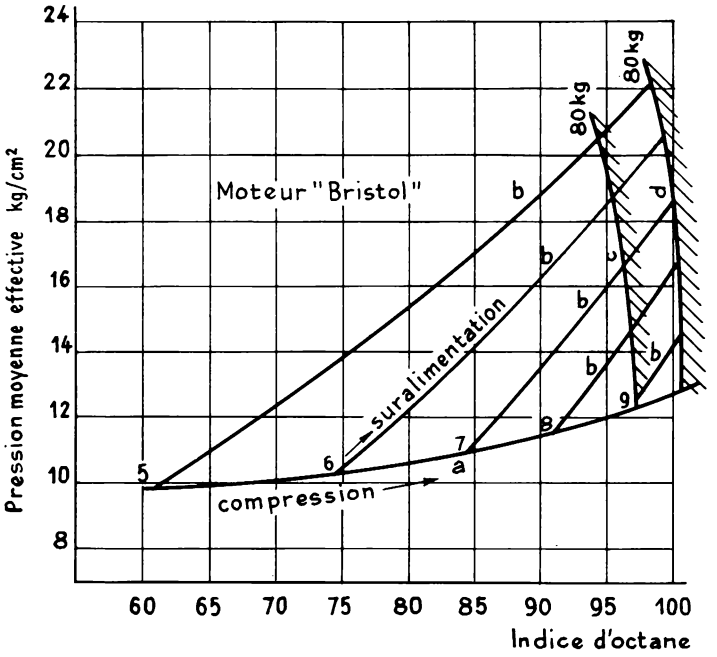



mécanique; dans le cas d'une turbosoufflante, la consommation aurait probablement baissé.

Le second diagramme est relatif à un monocylindre "Bristol" dans lequel on s'était rapproché au maximum des conditions de vol.

Le changement de combustible de 85 à 100 octane permet de faire passer la pression moyenne de 10,8 à 12 kg/cm$^2$ par une augmentation de compression de 7 à 9.

Le même changement de combustible, en conservant la compression 7 et en suralimentant, permet de passer à 16 kg pour la richesse normale et à 18 kg avec un mélange riche et ceci tout en gardant la même pression maxima de 80 kg.




Influence de la compression et de la suralimentation sur pression moyenne

Courbe a : pression moyenne par la compression
Courbe b : pression moyenne par la suralimentation
Courbe c : limite d'égale pression maxi. 80 kg richesse croisière
Courbe d : limite d'égale pression maxi. 80 kg richesse de décollage

## CHOIX DE L'INDICE D'OCTANE DES CARBURANTS POUR L'AVIATION

Les méthodes de mesure de la détonation que nous avons étudiées jusqu'ici sont valables pour le moteur d'automobile. On s'est longtemps servi de ces méthodes : Motor et Research ou de méthodes dérivées, pour l'aviation, tant que les carburants ne dépassaient pas ou peu 100 d'octane. Néanmoins le problème de l'aviation est différent et on a intérêt à utiliser un mode opératoire qui se rapproche le plus possible du fonctionnement des moteurs d'avions poussés. Ces moteurs sont tous obligatoirement équipés de compresseurs, d'où l'étude et la mise au point de méthodes de classement des carburants sur moteur suralimenté. M. Boerlage, du laboratoire de la Royal-Dutch Shell à Delft, est à l'origine de la mise au point de ces méthodes.

Deux problèmes dominent l'utilisation de carburants à indice

d'octane élevé en aviation : le problème du décollage et celui de la marche en croisière à consommation réduite. Les méthodes de mesure de la détonation tendent à estimer la valeur antidétonante du carburant dans ces deux modes d'utilisation.

## Problème du décollage en aviation

On sait que les conditions de fonctionnement du moteur d'avion au décollage sont des plus rigoureuses puisqu'on demande, à ce moment, au moteur sa pleine puissance, dans des conditions de refroidissement médiocres, conditions éminemment favorables à l'apparition de la détonation. Plusieurs solutions sont possibles pour utiliser au mieux le moteur :

a) Action sur l'allumage : on peut réduire l'avance à l'allumage. Le retrait de l'avance fait perdre 10 % de puissance, mais il permet, par une suralimentation poussée, de regagner et au-delà cette perte et de faire réaliser un gain assez peu important d'ailleurs. Ce procédé appliqué par "Bristol" avant la guerre n'a pas été généralisé en raison de l'échauffement exagéré des soupapes d'échappement.

b) Emploi d'un carburant spécial à plus haut indice d'octane pour le décollage que pour la croisière, ce procédé entraîne des complications dans l'alimentation.

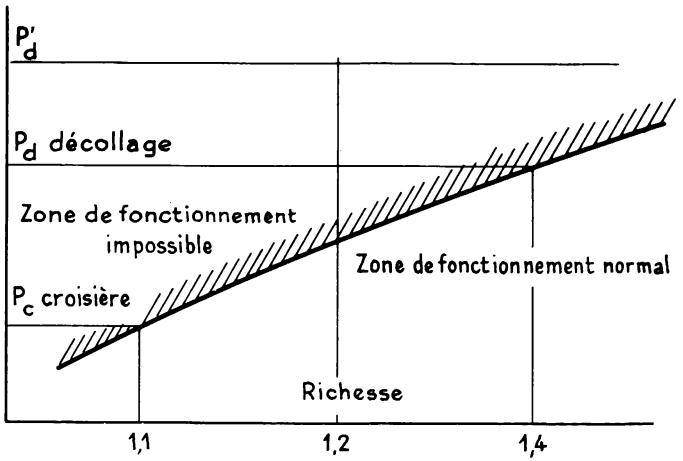
c) Carburants d'addition aux carburants de croisière, mélangés ou injectés : aniline, acétone, alcool butylique et même eau. Ces solutions, essayées aux Etats-Unis, ne semblent pas avoir été retenues.

d) On peut, enfin, et c'est le procédé le plus pratique, employer un même carburant pour la croisière et le décollage en enrichissant au décollage, procédé applicable en carburation et en injection.

Si l'on trace, pour un carburant donné, la courbe donnant les pressions de suralimentation en fonction de la richesse du mélange pour la détonation commençante (figure p.106), on divise le plan en deux zones : l'une où le mélange détone et où le fonctionnement est impossible, l'autre où le fonctionnement est normal. La position de cette courbe est caractéristique du carburant.

Si $P_c$ est la pression de suralimentation en croisière, il sera nécessaire d'avoir au moins la richesse 1,1 pour ne pas détoner.

Si $P_d$ est la pression de suralimentation au décollage, le simple enrichissement de 1,1 à 1,4 permettra de décoller. On pourra, dans




Pression de suralimentation pour le début de la détonation

ce cas, utiliser le même carburant pour le décollage et la croisière. Ceci est le cas le plus courant dans l'aviation commerciale.

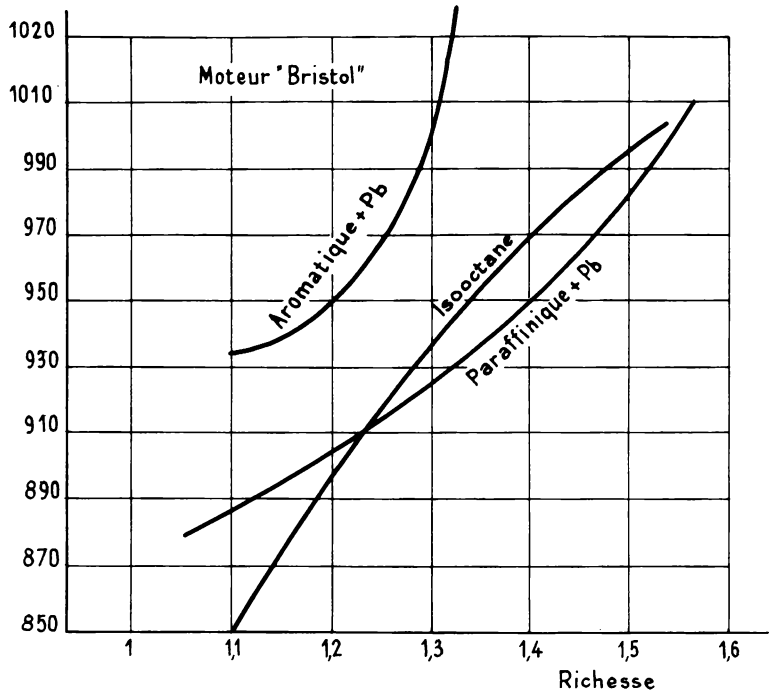
Si la pression de suralimentation est P'd, l'artifice de l'enrichissement au décollage ne suffira pas et il y aura lieu d'utiliser une autre méthode (injection d'eau, d'alcool, etc.). C'est le cas d'avions militaires de grande performance.

On voit que l'emploi d'un seul carburant dépend, d'une part, du rapport $\frac{P_d}{P_c}$ et, d'autre part, de la position, dans le plan, de la courbe caractéristique du carburant. Cette position est elle-même fonction de la composition chimique de ce carburant et de son mode de traitement.

Nous donnons ci-après quelques-unes de ces courbes caractéristiques.

En règle générale, les combustibles aromatiques (sauf benzène) ont une caractéristique plus relevée. C'est ainsi que certains carburants à base de toluène ont une caractéristique presque verticale, c'est dire que dans ce cas, à partir d'une certaine richesse, on peut suralimenter autant qu'on le veut sans crainte de détonation. On est évidemment limité dans cette voie par les températures de culasse, par la tenue des bougies et par l'auto-allumage.

On peut remarquer, en outre, que le plomb tend à relever la courbe caractéristique, c'est dire qu'il se comporte beaucoup mieux en réalité que ne l'indique la Motor method C.F.R. normale.




L'influence de la richesse sur la détonation. Causes

L'action de l'enrichissement du mélange sur le mécanisme de la détonation, quoique étant extrêmement complexe, peut être résumée ainsi :

1. Action retardatrice

a) Par diminution des températures et des pressions de l'"End gas" (dernière partie du mélange qui auto-allume) à cause de la diminution du rapport des chaleurs spécifiques.

b) Par diminution de la température du mélange résultant de la vaporisation de l'excédent de carburant.

c) Par augmentation de la durée de compression de l'"End gas" due à la diminution de la vitesse du front de flamme.

d) Par diminution de la température des parois de la chambre de combustion, due elle-même à la diminution de la température de flamme dans laquelle la dissociation joue un rôle prépondérant.

2. Action accélératrice

Par l'enrichissement de l'"End gas" lui-même qui tend à accélérer son auto-allumage.

De ces deux actions contraires de l'enrichissement, la première l'emporte de beaucoup sur la seconde, de sorte qu'en définitive il provoque un recul de la détonation.

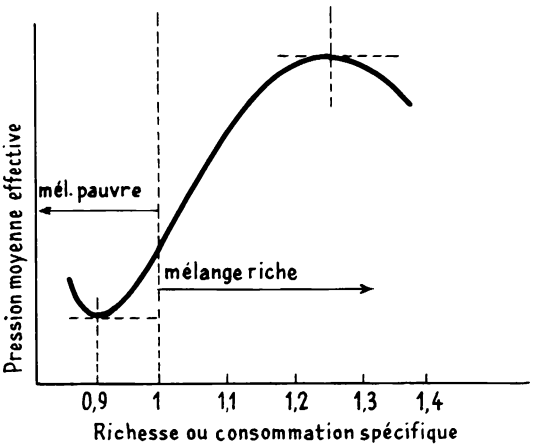
Les considérations ci-dessus expliquent aussi, par l'action plus ou moins prépondérante de tous ces facteurs variables, pourquoi certains combustibles se comportent mieux que d'autres dans les mélanges riches; elles expliquent aussi les maxima et les minima des courbes de pression moyenne en fonction de la richesse.

Deux combustibles peuvent donc avoir la même valeur antidétonante dans les mélanges pauvres pour la croisière, mais différer notablement dans les mélanges riches.

La variation de la valeur antidétonante en fonction de la richesse est souvent exprimée par une courbe de "sensibilité" (figure ci-dessous).

Les différents points de cette courbe sont obtenus en diminuant la richesse pour une pression moyenne déterminée jusqu'au début de la détonation.

Dans les moteurs de laboratoire, il est plus pratique de mesurer la consommation que la richesse et d'augmenter la puissance jusqu'au début de la détonation. On exprime cette puissance,en pression moyenne effective, pour permettre une comparaison facile entre des moteurs de régimes différents.




Courbe type de sensibilité de mélange

LES METHODES DE MESURE DE VALEUR ANTIDETONANTE POUR L'AVIATION

D'après ce que nous venons de voir, il est évident qu'un seul

essai ne peut faire prévoir exactement les qualités antidétonantes d'un carburant aviation.

Dans les conditions de croisière où l'on recherche les faibles consommations, on utilise les mélanges pauvres; la méthode utilisée actuellement est celle dénommée F 3 ou I C (ANF 19 en norme française).

Dans les conditions de décollage ou de surpuissance accidentelle (avion de chasse), la nécessité d'obtenir des pressions moyennes élevées conduit à l'emploi des mélanges riches; on utilise la méthode en suralimentation en mélanges riches dénommée F 4 (ANF 18 en norme française).

## Méthode F3 pour mélange pauvre

Le moteur employé a une forme légèrement modifiée du moteur CFR normal. L'intensité de détonation est mesurée par un thermocouple . Ce n'est donc pas la mesure directe de la détonation elle-même, mais bien celle de son effet thermique, ce qui semble plus logique.

Les conditions de fonctionnement du moteur ont été données dans un tableau précédent.

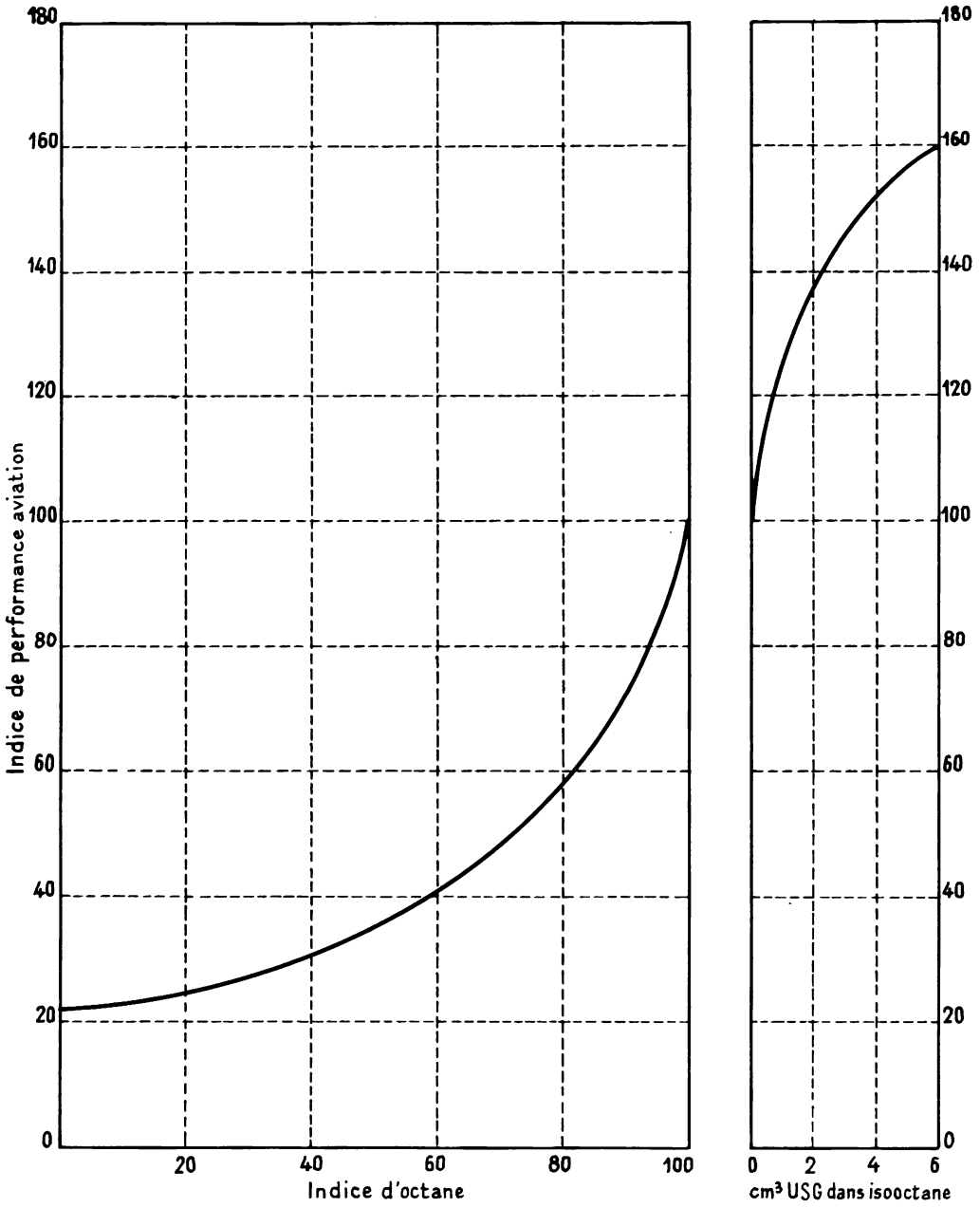
On utilise comme carburant de référence, soit de l'heptane et de l'isooctane pour les indices au-dessous de 100, soit de l'isooctane éthylé à divers taux déterminés pour les valeurs au-dessus de 100. Celles-ci ne sont d'ailleurs plus des indices d'octane mais des indices de performances.

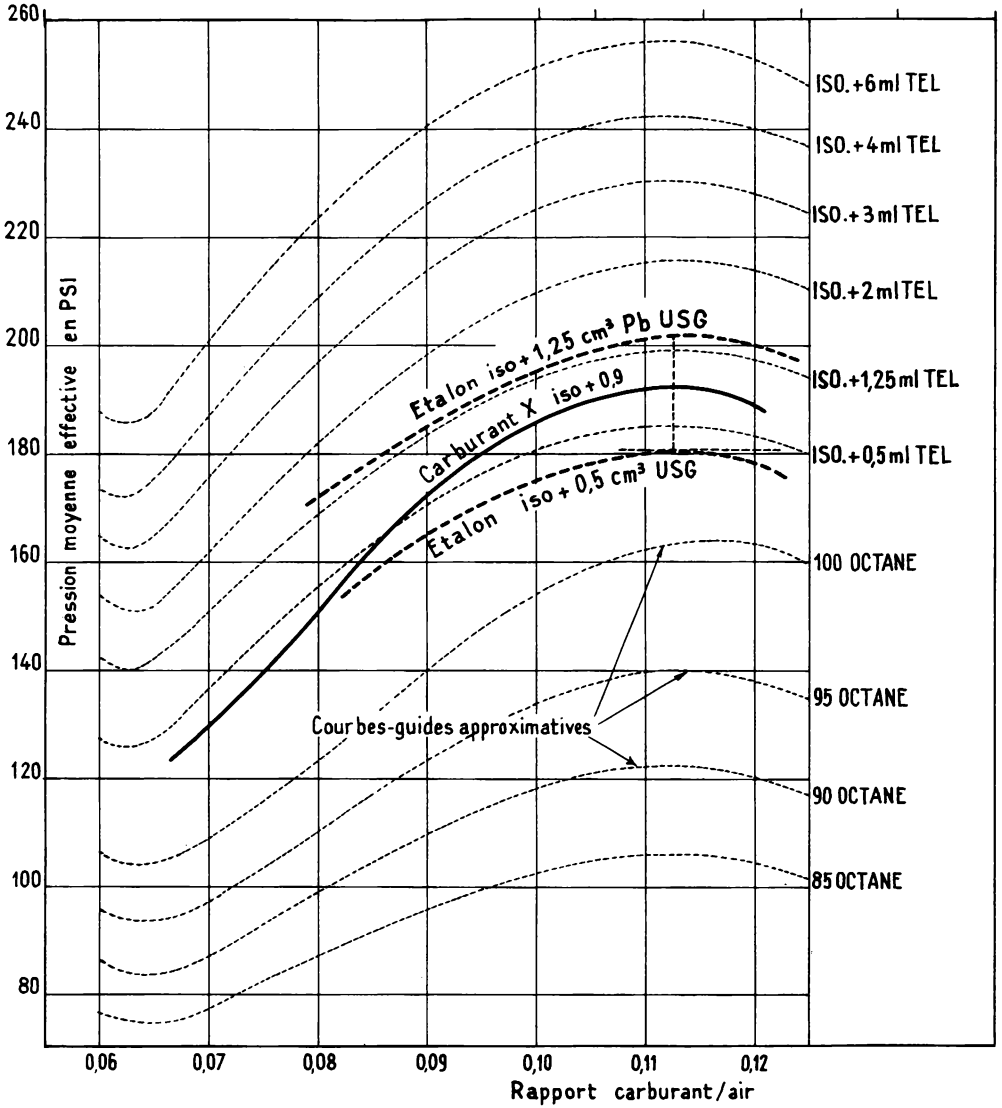
Cet indice de performance est empirique, il indique approximativement le pourcentage de puissance susceptible d'être obtenu avec le carburant par rapport à celle obtenue avec l'isooctane sur les moteurs d'aviation.

Exemple. - Un carburant de 90 d'octane par la méthode de F 3 a un indice de performance en mélange pauvre de 72.
Un carburant équivalent à isooctane + 1 $cm^3$ USG a un indice de performance de 128.

## Méthode F4 par suralimentation en mélange riche

Cette méthode utilise le moteur CFR normal avec carter à grande vitesse, les conditions étant celles données dans un tableau précédent.


180
160
140
120
100
80
60
40
20
0
Indice de performance aviation
20
40
60
80
100
Indice d'octane
0
2
4
6
cm³ USG dans isooctane




Canevas de mesure par suralimentation en mélange riche

Le moteur électrique synchrone est monté en bascule pour la mesure de la puissance moyenne indiquée (puissance effective - puissance d'entraînement). On dose l'air de suralimentation provenant d'une capacité à pression constante (3,5 kg) par tuyère et le carburant par pesée sur balance.

La méthode consiste à tracer la courbe "pression moyenne indiquée - richesse" pour une légère intensité de détonation. Cette courbe est tracée sur le même graphique que celles des carburants de référence (voir fig. p.111).

On interpole sur l'ordonnée passant par le maximum de la courbe de référence inférieure (sur la figure iso + 0,5 $cm^3$ USG) et on détermine ainsi l'équivalent isooctane + plomb du carburant à mesurer (sur la figure iso + 0,9 $cm^3$ USG).

On se reporte alors à la courbe ou mieux à des tableaux et on obtient ainsi l'indice de performance (124 pour l'exemple de la figure).

En résumé :

Mélanges pauvres, méthode F 3

Au-dessous de 100 on mesure directement des indices d'octane (heptane - octane) que l'on peut, si l'on veut, transformer en indice de performance.

Au-dessus de 100, on mesure des équivalents isooctane + plomb que l'on transforme obligatoirement en indices de performances.

Mélanges riches, méthode F 4 par suralimentation

Au-dessous de 100 on cherche l'équivalent heptane - isooctane et on traduit en indice de performance.

Au-dessus de 100 on cherche l'équivalent isooctane + plomb et on traduit en indice de performance.

## VALEUR ANTIDETONANTE DES CARBURANTS UTILISES DANS L'AVIATION FRANÇAISE

Quatre types de carburants donnés par le tableau de la page 113.

Ces normes sont d'ailleurs copiées exactement sur les normes américaines.

| Type | Couleur internationale | Plomb max $cm^3$ par litre | Méthode d'essai | | Utilisation |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | Mélange pauvre | Mélange riche | |
| 80 | incolore | 0 | ANF 19 | | Avions d'entraînement. |
| 80 éthylé | rouge | 0,8 | | | |
| 91/98 | bleue | 1 | ANF 19 | ANF 18 | Avions de combat révoqués. Entraînement avancé. |
| 100/130 | verte | 1,2 | ANF 19 | ANF 18 | Combat général. Le plus courant. Aviation commerciale. |
| 115/145 | pourpre | 1,2 | ANF 19 | ANF 18 | Super combat. Emploi limité. |

Tendances des carburants à l'allumage par point chaud

Certains carburants ont, plus que d'autres, tendance à auto-allumer par point chaud. Ceci est un inconvénient sérieux et peut amener à rejeter l'utilisation de certains carburants comme le cumène, qui sont mauvais à cet égard tout en ayant une très haute valeur antidétonante. Le classement s'opère en mesurant l'énergie développée dans un point chaud artificiel chauffé électriquement, le critère de la mesure étant l'augmentation rapide de la température de la culasse lorsque l'auto-allumage se produit.

On utilise pour cette échelle d'auto-allumage le cumène à la valeur 0 et l'isooctane à la valeur 100; on a obtenu les chiffres suivants :

| | |
|---|---|
| Méthanol ..... | négatif |
| Cumène ..... | 0 |
| Benzène ..... | 18 |
| Toluène ..... | 94 |
| Ether isopropylique ..... | 100 |
| Acétone ..... | 100 |
| Isooctane ..... | 100 |

## Composition des carburants aviation

Nous avons vu précédemment que l'enrichissement du mélange carburé pour satisfaire aux conditions de décollage avait mis au premier plan l'intérêt des carbures aromatiques qui se sont révélés très supérieurs aux paraffiniques à chaîne ramifiée.

L'essence aviation est maintenant le résultat d'un savant dosage de produits parfaitement définis ou tout au moins de classes de produits qu'on peut répartir en quatre catégories :

1. L'essence de base, formée soit d'essence de distillation provenant de bruts de préférence naphténiques, soit d'essence de cracking catalytique dont la teneur en aromatiques est intéressante (à la condition de se débarrasser des oléfines susceptibles de provoquer des gommes).

2. Les dopes paraffiniques : isopentane, isooctane, alkylats.

3. Les dopes aromatiques : cumène, toluène, xylène et éthylbenzène.

4. Le plomb tétraéthyle.

Les compositions peuvent être assez variables. Nous donnons néanmoins, à titre d'exemple, celle d'une essence 100/130 :

| | |
|---|---|
| Essence de distillation à haut indice ..... | 50 % |
| Essence de cracking catalytique ..... | 18 % |
| Isopentane ..... | 14 % |
| Alkylat ..... | 18 % |
| Plomb tétraéthyle ..... | 1,2 $cm^3/l$ |

## MOYENS D'ELEVER L'INDICE D'OCTANE DES CARBURANTS

Il existe trois moyens d'élever les indices d'octane des carburants.

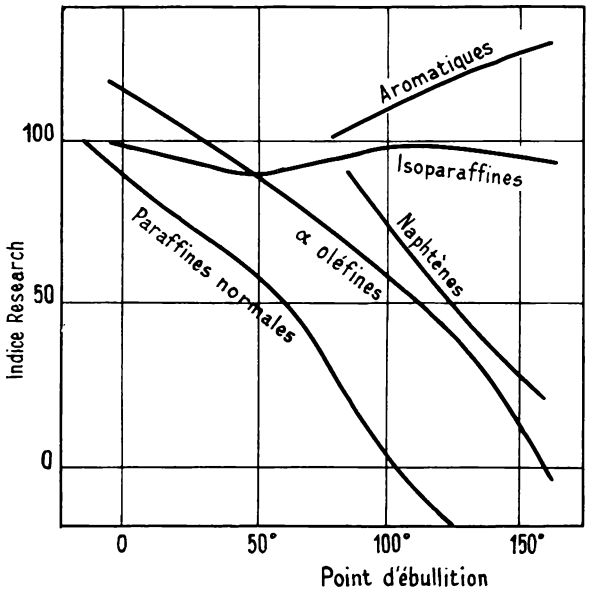
I. Par traitement en raffinerie en agissant sur la constitution chimique des hydrocarbures, et en sélectionnant les coupes de distillation de manière que l'octane soit "bien placé"dans la distillation du produit final.

II. Par mélanges avec des produits d'addition à forte valeur antidétonante.

III. Par l'addition de dopes antidétonants.

Ces trois moyens sont le plus souvent employés simultanément. Nous examinerons ci-dessous ces trois moyens.

## I. Traitement en raffinerie




La sélection des coupes après traitement doit tenir compte de la place de l'octane dans la courbe de distillation. Nous verrons plus loin que pour les voitures françaises on a intérêt à avoir de l'octane en tête de la distillation, tout au moins pour les voitures à transmission classique. Cette observation étant sujette à révision en cas de généralisation des transmissions hydrauliques, nous donnons ci-contre les variations d'indice d'octane en fonction du point d'ébullition pour différentes familles d'hydrocarbures.

Signalons aussi, avant d'énumérer les différents traitements en raffinerie que le traitement à l'acide sur les essences de cracking diminue légèrement l'indice d'octane, mais améliore nettement la susceptibilité au plomb par action sur les hydrocarbures non saturés.

Ce même raffinage à l'acide a le même effet sur les essences de distillation directe, la redistillation amplifiant encore le gain en octane.

Enfin, l'élimination de toutes traces de soufre dans les essences a une action bénéfique marquée sur la susceptibilité au plomb.

Octane des carburants en fonction des modes d'obtention

a) Distillation directe des fractions de tête du brut (Straight-run)

Pétrole marocain ..... 22 $F_1$ clear
Lagunillas ..... 70 $F_1$ clear
Kuwait 40-100 ..... 63 $F_1$ clear
Kuwait 40-200 ..... 44 $F_1$ clear

b) Essence de dégazolinage des gaz naturels

Saint-Gaudens ..... 60 clear
Lacq ..... 92 clear

c) Cracking thermique de gas-oil ou résidu

Cracking résidu Irak ..... 70 à 73 $F_1$ clear
Cracking Lagunillas
coupe 40-180..... 75 $F_1$ clear

d) Distillat de cracking catalytique

90 à 96 selon catalyseur et type d'installation.

e) Essences obtenues par synthèse

1. Hydrogénation destructive.- C'est un cracking en présence de catalyseur sous forte pression d'hydrogène. L'octane est bas (40 $F_1$ clear), mais la susceptibilité au plomb est excellente (70 $F_1$ avec 0,4 de plomb).

2. Polymérisation des gaz liquéfiables (propylène-butylène).- 95 $F_1$ sur propylène, 97 $F_1$ sur butylène.

Susceptibilité au plomb mauvaise, mais excellent comme agent de mélange par les essences à bas indice (amélioration réelle beaucoup plus forte que ne l'indique la règle des mélanges).

3. Alkylation.- Addition catalytique d'un carbure éthylénique et d'un isoparaffinique pour donner une isoparaffine lourde 90-94 $F_1$ clear, excellente susceptibilité (dépasse 100) exempte d'impuretés - carburant de base pour essence aviation 100-130 et 115-145.

f) Reforming thermique

C'est un cracking thermique poussé utilisant non plus des gas-oils

oils ou résidus, mais "réformant" sans catalyseur une essence de bas indice d'octane par diminution du poids moléculaire et déshydrogénation.

Ce reforming thermique n'attaque pas les aromatiques qui restent dans le distillat avec une concentration accrue.

Ce reforming thermique est très largement utilisé pour améliorer l'octane des essences Straight-run, par exemple :

Kuwait Straight-run ..... 30 $F_1$ clear
Kuwait Straight-run réformé .... 78 $F_1$ clear

On enregistre une perte en essence de l'ordre de 40 % de la charge qui sont transformés en gaz et en fractions plus lourdes.

g) Reforming catalytique

L'essence à transformer est chauffée sous pression moyenne en atmosphère d'hydrogène en présence de catalyseurs métalliques : molybdène (hydroforming), platine (platforming, Houdry-forming). Il agit par abaissement du poids moléculaire, déshydrogénation des naphtènes pour donner des aromatiques et isomérisation des paraffines.

Le rendement de ce traitement est excellent (peu de gaz), les indices d'octane très élevés, l'essence exempte d'impuretés. Par contre, les reformats catalytiques sont plus lourds (50 % à 140) que les reformats thermiques et leur densité plus élevée à cause de leur forte teneur en aromatiques.

Ces deux derniers points constituent de graves inconvénients et font que l'on ne peut considérer les essences de reforming catalytique comme des produits de base devant être améliorés par des essences plus légères.

Exemple. - En traitant par reforming catalytique une essence lourde Kuwait d'octane 30, on peut obtenir un $F_1$ clear de 93. On peut encore améliorer ce $F_1$ en ne gardant que la coupe la plus lourde riche en aromatiques avec $F_1 > 100$, soit encore en extrayant ces aromatiques par solvant (rexforming) $F_1 > 100$, soit encore procéder à un reforming thermique de ce reformat catalytique qui n'a pas d'action sur les aromatiques existants et qui améliore l'indice des autres hydrocarbures (isoplus).

h) Isomérisation catalytique

La fraction du brut la plus gênante pour obtenir des indices élevés est la fraction 40-100. Son octane est insuffisant (78 $F_1$ plombée) sur Moyen-Orient) et le reforming catalytique ne l'améliore pas, l'isomérisation catalytique a pour but précisément de réaliser des améliorations substantielles de ce produit en transformant les paraffines en isoparaffines dont les indices d'octane sont très supérieurs. On peut obtenir ainsi des fractions légères en iso qui, plombées, dépassent largement l'indice 100. Ce sont des essences exemptes d'impuretés qui complètent très bien les reformats catalytiques, leur mélange donne des valeurs antidétonantes très élevées, aussi bien en tête qu'en queue de distillation.

Composition des essences à indice d'octane élevé

L'examen de tous les traitements ci-dessus conduit tout naturellement à ne retenir, pour la fabrication des carburants à indice élevé, que :

- Le cracking catalytique
- Le reforming catalytique
- L'isomérisation catalytique
- L'alkylation
- La polimérisation des gaz liquéfiables

Exemple de composition de carburant à indice au-dessus de 100 $F_1$.- On disposera d'une coupe lourde de reforming catalytique plombée donnant un indice d'au moins 100 à laquelle on mélangera une fraction légère 40-100 de cracking catalytique dont l'octane plombé est voisin de 99 $F_1$. Ce carburant sera à peu près exempt d'impuretés, ayant un indice 100 aussi bien en tête qu'en queue de distillation.

Au-dessus de 100, on pourra faire appel à l'isopentane (plombé 104) ou à l'isohexane (plombé 106).

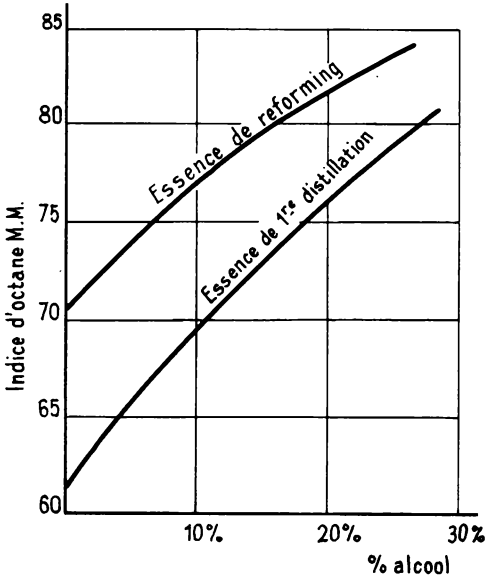
Les mélanges d'isomères en tête de distillation et de reformat catalytique en queue donneront plombés des essences à indices encore plus élevés, autorisant des taux de compression dans les moteurs supérieurs au plafond pratiquement admissible. Ce sera peut-être la fin de la course à l'octane.

## II. Mélange avec des produits d'addition

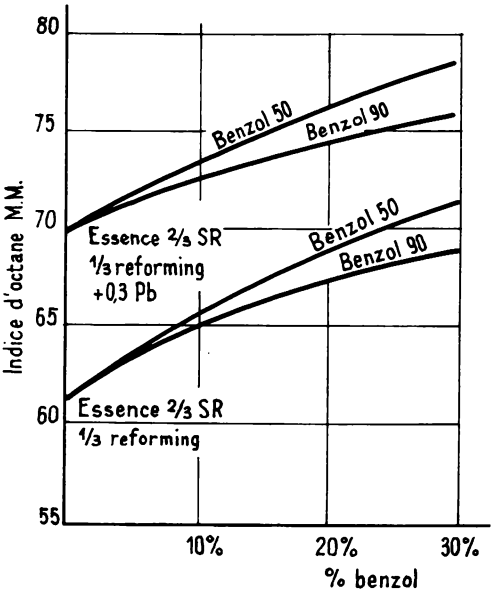
Le mélange d'une essence avec des produits d'addition dont les

plus courants sont le benzol, l'alcool, l'aniline, les cétones ou d'autres hydrocarbures comme l'isooctane, le cumène, l'éther isopropylique, améliore nettement l'indice d'octane de l'ensemble, sans cependant suivre la règle des mélanges.

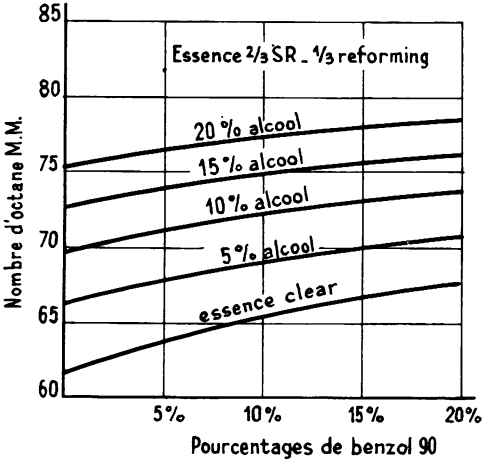
En général, la susceptibilité à tous les mélanges cités précédemment est meilleure avec une essence de première distillation qu'avec une essence de cracking. Cette susceptibilité dépend aussi, dans une large mesure, de la nature du brut traité. Les figures ci-après donnent quelques exemples.



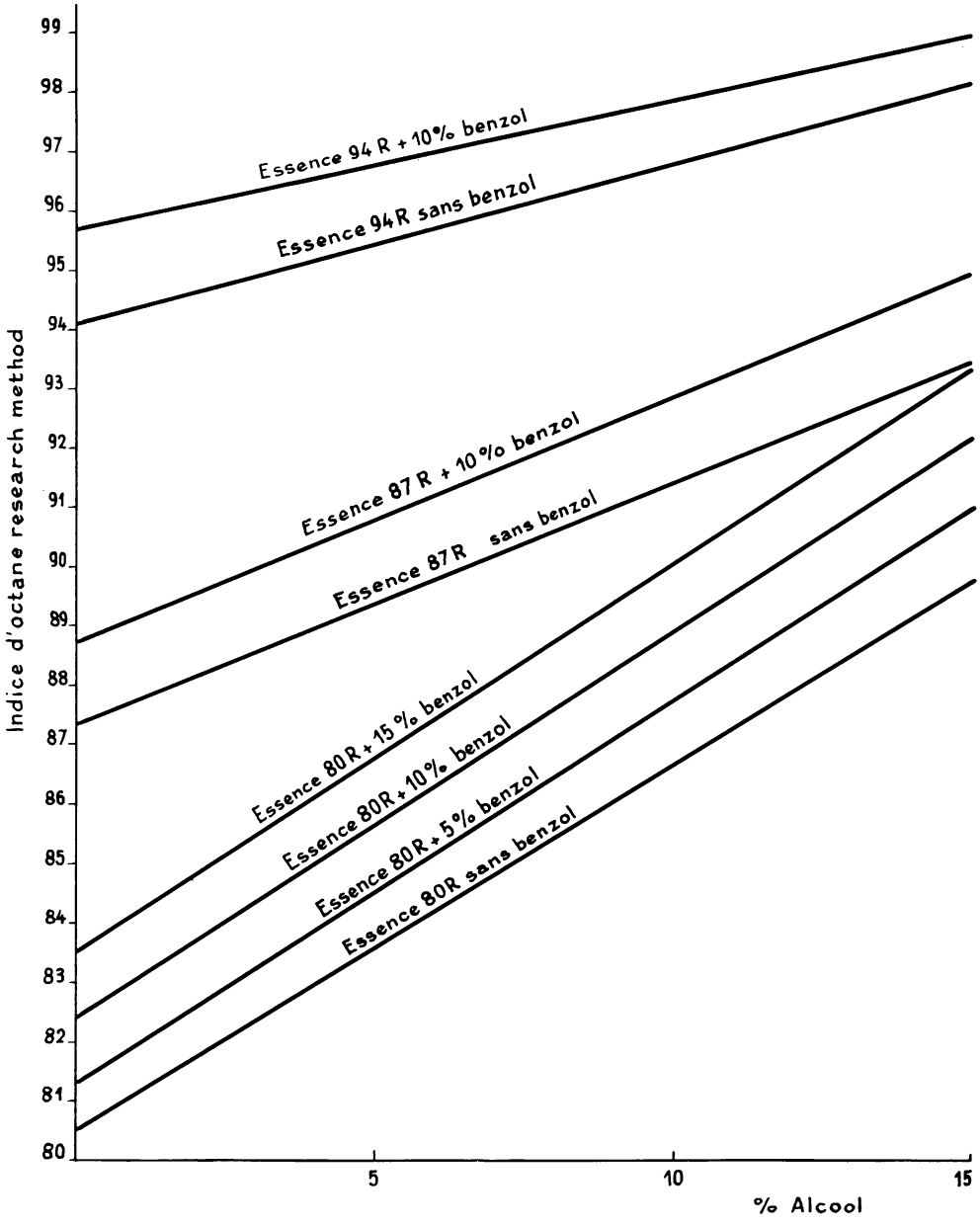

Mélange essence-alcool



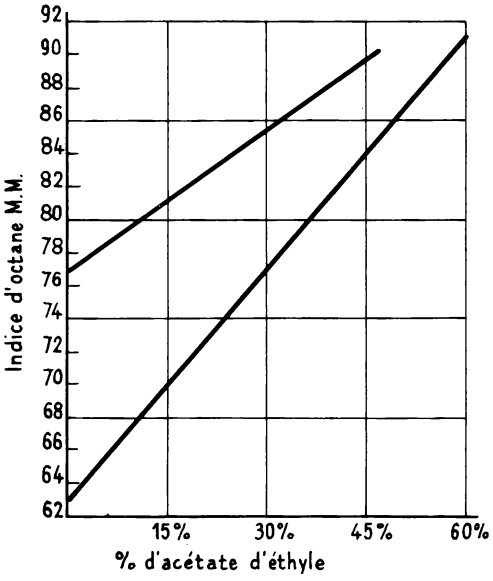

Mélange essence-benzol



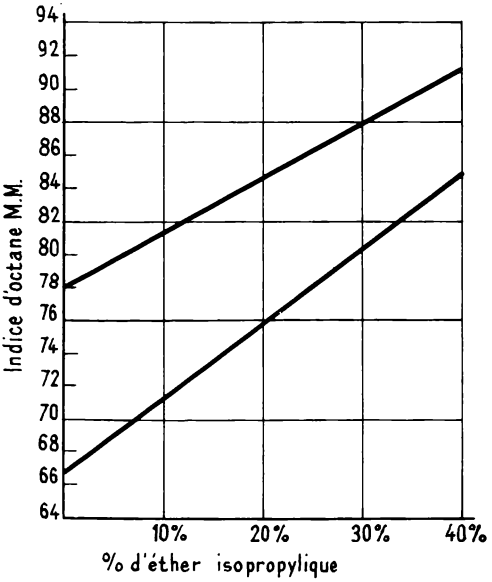

Mélange essence-alcool-benzol




Susceptibilité alcool-benzol pour essences du commerce d'indice d'octane différent




Action de l'acétate d'éthyle




Action de l'éther isopropylique

Signalons aussi que certains éthers mélangés à des essences d'indice d'octane déjà élevé sont susceptibles de donner des carburants d'indices nettement supérieurs à 100 $F_1$. La généralisation de la vente de ces carburants dépend des prix de revient de ces éthers à échelle industrielle.

## III. Emploi de dopes antidétonants

Il existe enfin un autre moyen d'augmenter l'indice d'octane d'un carburant, c'est le "doper" avec un antidétonant. Dès 1922, les laboratoires de la General Motors aux Etats-Unis avaient découvert que l'addition aux essences de petites quantités de composés organiques ou organo-métalliques avait pour effet de diminuer la sensibilité au choc des essences et permettait l'emploi de compressions plus fortes. C'est ainsi qu'ont pris naissance les antidétonants. Les substances de nature très différente sont capables de remplir ce rôle d'une manière plus ou moins efficace : iode, aniline, sélénium, étain, plomb, fer, etc. Parmi tous ces corps, le plomb tétraéthyle et le fer pentacarbonyle, le premier, le plus actif, est l'antidétonant usuel dans les pays anglo-saxons et en France; le second, employé autrefois en Allemagne, donne à la combustion des oxydes de fer dont les propriétés abrasives sont fâcheuses.

Signalons que l'éthyl américain a mis sur le marché un nouvel antidétonant à base de manganèse, dénommé AK 33 X. Les propriétés de ce nouveau dope renforceraient l'action du plomb tétraéthyle lui-même.

Le plomb tétraéthyle, utilisé à des doses de l'ordre de 0,2 à 0,7 $cm^3$ dans les carburants automobile et 0,8 à 1,6 $cm^3$ pour les carburants aviation, reste le dope universellement employé, il constitue le moyen le plus économique d'augmenter ou d'ajuster l'indice d'octane d'un carburant.

Le plomb tétraéthyle

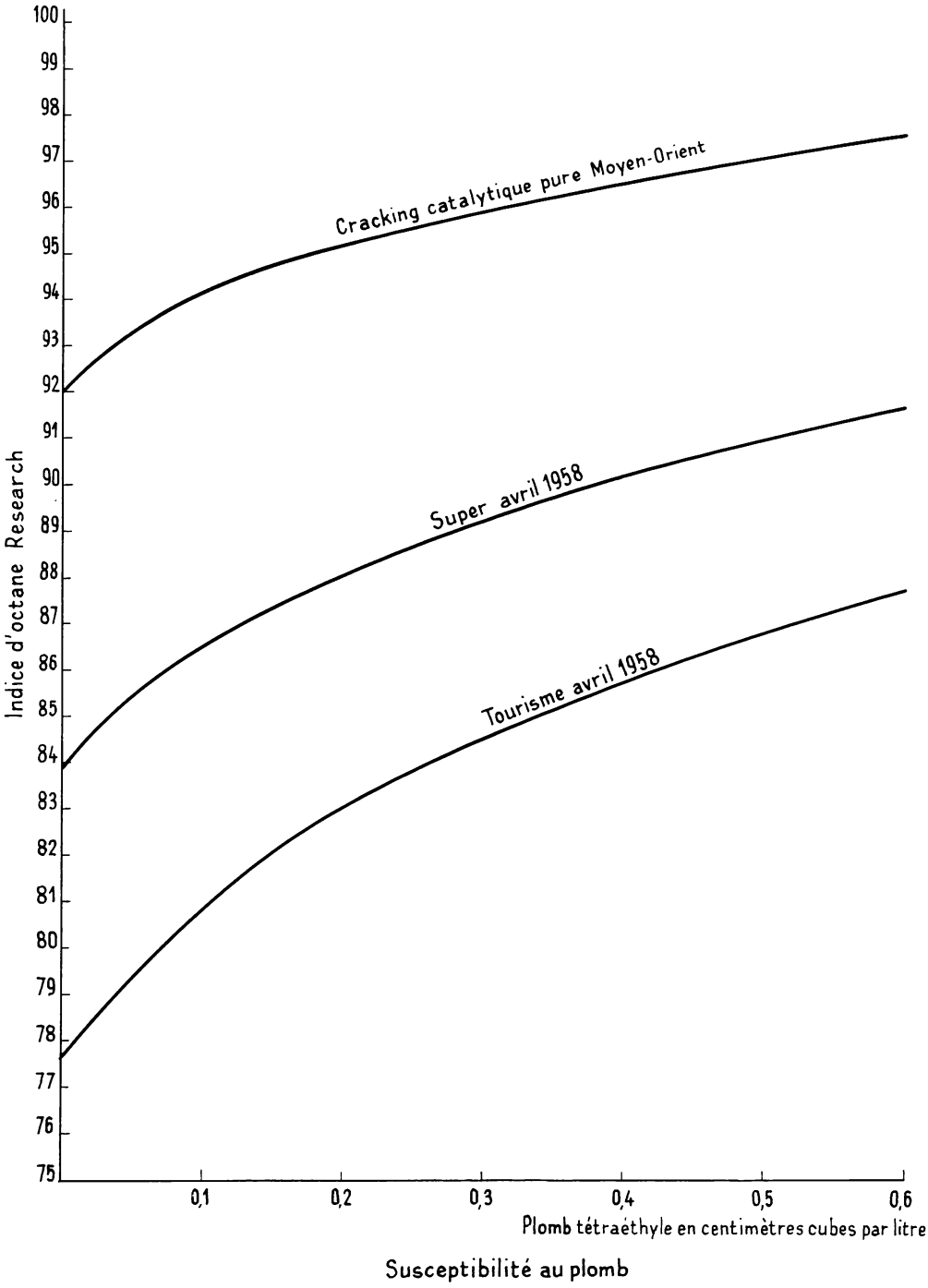
Comme nous l'avons vu, le plomb tétraéthyle est un composé organo-métallique, liquide, de densité 1,66, dont le point d'ébullition est voisin de 200°. Son action antioxydante consiste à empêcher la formation des peroxydes au sein du mélange carburé pendant le temps de compression et, par conséquent, de reculer l'apparition de la détonation.

Le plomb tétraéthyle pur ne peut être incorporé à l'essence, car l'oxyde de plomb qui se forme pendant la combustion se déposerait en quantité importante sur les parois de la chambre de combustion. On l'utilise sous forme d'"ethyl fluid" qui a la composition moyenne suivante :

| Composition ethyl fluid en poids | | |
|---|---|---|
| | Qualité aviation | Qualité auto |
| Plomb tétraéthyle ..... | 61,42 % | 61,48 % |
| Dibromure d'éthyle ..... | 35,58 % | 17,85 % |
| Dichlorure d'éthyle ..... | | 18,81 % |
| Pétrole et colorant ..... | 3 % | 1,85 % |

Le but du dibromure et du dichlorure est de transformer l'oxyde de plomb en bromure et chlorure de plomb volatils aux températures d'utilisation et qui sont évacués normalement par les gaz d'échappement; malheureusement, les réactions ne sont jamais complètes et il reste toujours une certaine quantité d'oxyde de plomb, ce qui présente pour les moteurs un certain nombre d'inconvénients que nous étudierons plus loin.

Susceptibilité au plomb des carburants. - L'effet du plomb n'est pas le même sur toutes les essences. Elles sont plus ou moins




Susceptibilité au plomb

susceptibles selon que, pour la même qualité de plomb ajoutée, l'augmentation d'indice d'octane est plus ou moins grande.

Ce sont en général les essences paraffiniques de première distillation qui sont les plus susceptibles au plomb; puis viennent les naphténiques et enfin les aromatiques qui le sont nettement moins.

Le traitement a aussi une influence. Le cracking et le reforming thermique diminuent sensiblement la susceptibilité. Enfin, le raffinage a aussi une influence. C'est ainsi que le traitement à l'acide, s'il diminue l'indice d'octane, augmente la susceptibilité.

La présence de soufre ou de mercaptans diminue aussi notablement la susceptibilité.

Nous donnons, sur la figure de la page 123, quelques exemples de courbes de susceptibilité au plomb.

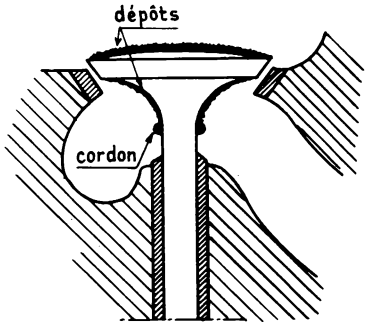
Effets du plomb sur les moteurs. - L'utilisation du plomb, qui était relativement réduite avant la guerre, s'est développée considérablement pendant, et surtout après.

En France, avant la guerre, la limite légale avait été fixée à 0,3 $cm^3/l$ au maximum. Pendant la guerre, les américains dont la production était orientée vers le maximum de rendement du brut, utilisaient en moyenne 0,8 $cm^3$, ce qui n'a pas été sans sérieux inconvénients pour leurs moteurs, aussi bien d'ailleurs que pour les nôtres tout de suite après la guerre, alors que, nos raffineries détruites, nous ne disposions pas d'autre chose que de la fameuse essence rose de l'armée américaine.

Actuellement, en France, la proportion maxima légale a été portée à 0,6 $cm^3$ et la tendance des pouvoirs publics est de la porter à 0,8 $cm^3$, ceci à la demande du ministère de la Défense nationale et malgré l'opposition des constructeurs. La Défense nationale prétend, en effet, qu'en cas de guerre, et après destruction des raffineries françaises, l'armée ne disposant que de l'essence d'importation américaine à 0,8 $cm^3$ de plomb, il importe que les véhicules civils réquisitionnés puissent absorber 0,8 $cm^3$ de plomb. C'est ainsi un moyen d'obliger les constructeurs à faire des moteurs tenant à cette proportion, ce qui n'est pas le cas actuellement où les incidents de soupapes d'échappement commencent à partir de 0,5. Cette obligation n'irait d'ailleurs pas sans augmenter le prix de revient des voitures.

Problème de la tenue des soupapes d'échappement au plomb. - La destruction des soupapes par les produits de combustion du plomb peut se faire de trois manières différentes :

1. Il se forme sur la tête de la soupape un résidu de combustion composé principalement de résidus carbonés enrobant des oxydes de plomb, oxysulfate de plomb, oxybromure, ces dépôts aux environs de 650° deviennent pâteux et, se détachant, peuvent se loger entre soupapes et sièges; il se produit alors un martèlement avec formation d'une empreinte amorce de fuite, c'est ensuite la destruction classique par coup de chalumeau.




Destruction des soupapes d'échappement par le plomb

2. Un deuxième mode de destruction est dû à la formation sous la soupape d'un dépôt analogue au précédent (figure ci-contre), ce dépôt gagnant de proche en proche le long de la tige arrive à former un cordon dur qui bute contre le guide, gênant ainsi la fermeture.

3. Enfin un troisième mode de destruction beaucoup plus rare, mais qui peut néanmoins se produire avec certains aciers, consiste en la corrosion des portées et sièges par le brome des halogènes à haute température, les piqûres qui en résultent peuvent aussi provoquer des amorces de fuites.

Dans le moteur, ces trois modes de destruction se produisent simultanément, il est évident que c'est le premier arrivé qui a raison de la soupape.

Les remèdes consistent à élever les points de fusion des dépôts en augmentant leur friabilité, à refroidir la soupape au maximum en facilitant l'évacuation des calories, c'est une question de dessin; en augmentant la dureté à chaud de l'acier à soupape pour éviter l'empreinte, amorce de fuite, ou enfin de faire tourner la soupape pour éviter le martèlement toujours au même endroit.

Les ennuis de soupapes, sérieux, il y a quelques années, sont maintenant très atténués et les constructeurs ont su par des changements d'acier, par un meilleur refroidissement, ou par des dispositifs particuliers, résoudre en grande partie le problème; les raffineurs ont de leur côté élevé les indices d'octane tout en maintenant les mêmes proportions de plomb, alors que celles-ci montaient aux Etats-Unis à 0,6 et 0,8 $cm^3/l$.

Action du plomb sur les bougies d'allumage. - Un autre inconvénient du plomb réside en la détérioration des bougies d'allumage,

d'une part,par l'usure des électrodes (corrosion) qui tendent à s'écarter (on a constaté sur certains moteurs, avec une essence 0,8 $cm^3$ de plomb, une usure de 1/10 mm par 10 h de fonctionnement, et, d'autre part, par la formation de dépôts dont le plomb est en grande partie responsable.

Ces dépôts sur les bougies perdent de leurs qualités diélectriques isolantes à haute température, diminuant ainsi l'énergie dans l'étincelle. Certains pétroliers, pour éviter ce défaut, incorporent à leurs carburants des composés de phosphore (tricrésyl-phosphate) qui, transformant les oxydes de plomb en composés phosphoreux dont les qualités diélectriques sont meilleures, améliorent ainsi les qualités d'allumage.

Le plomb et les dépôts dans les chambres de combustion. - Le problème des dépôts dans les chambres de combustion mérite d'être mentionné ; leurs inconvénients menacent en effet de devenir graves dans l'avenir, puisque s'accentuant avec l'élévation des compressions, ils peuvent même constituer une limite à cette élévation. Le raffineur s'efforce sinon de les supprimer complètement, du moins de les atténuer et en tout cas de les rendre moins nocifs.

On peut s'efforcer de distinguer parmi ces dépôts :

a) Des résidus carbonés de combustion provenant du carburant; leur quantité dépend de la qualité de la combustion, fonction elle-même de la richesse du mélange, du rapport C/H, du point final de distillation de l'essence et aussi de l'état physique du mélange carburé (si le combustible est complètement gazéifié au moment de l'allumage, la combustion sera bonne, elle sera moins bonne s'il subsiste des gouttelettes liquides).

b) Des résidus carbonés d'oxydation et de polymérisation des huiles de graissage. On a déjà pallié en partie cet inconvénient par l'utilisation des huiles détergentes.

c) Les impuretés contenues dans le carburant lui-même, gommes, inhibiteurs, soufre, ce dernier par son action vulcanisante ayant la propriété de durcir les dépôts et de les rendre plus tenaces.

d) Enfin, les oxydes, bromure, chlorure, métallique, résidus de combustion du plomb tétraéthyle et des halogènes qui l'accompagnent.

Il est remarquable que ces derniers dépôts représentant un pourcentage à peu près constant de la quantité de plomb apportée par le carburant, soit 2 à 3 % pour les moteurs d'aviation, 3 à 4 % pour les

moteurs d'automobiles, ce pourcentage est diminué par amélioration de la répartition et par abaissement du point final de l'essence.

Il est difficile de chiffrer les pourcentages de responsabilité dans le total des dépôts de chacune des causes ci-dessus, ils dépendent des conditions d'utilisation (ville-route) et de la teneur en plomb des carburants, on peut néanmoins fixer des ordres de grandeur : dans les moteurs d'aviation le plomb semble être responsable d'environ 75 % du poids des dépôts, pour les moteurs d'automobiles il ne le serait que pour 50 % dans une utilisation route et 70 % dans une utilisation ville.

Quantité de dépôts. - Le poids total des dépôts dans un moteur ne croît pas indéfiniment, on arrive au bout d'un certain nombre d'heures de marche ou de kilomètres parcourus (15 à 25 000 km) à un état d'équilibre, on peut donc penser qu'à partir de cette limite, sous l'effet conjugué de choc thermique et de turbulence, il se produit un écaillage, l'évacuation d'anciens dépôts, et leur remplacement par des nouveaux. Pendant leur évacuation, les anciens dépôts "flottent" à travers la chambre de combustion, sont portés à l'ignition et sont à l'origine du fameux "wild-ping" ou pré-allumage intempestif et momentané, accompagné de choc violent sourd à basse fréquence que l'on observe sur certains moteurs encrassés.

Répartition et nature des dépôts. - La quantité et la nature des dépôts varient considérablement suivant l'emplacement dans la chambre, puisque fonction des températures de parois.

Les analyses chimiques et spectroscopiques ont montré que les combinaisons fusibles à basse température : bromure de plomb, oxybromure se rassemblent aux endroits relativement froids (soupapes d'admission), les oxydes, oxy-sulfates à haut point de fusion se situent dans les endroits les plus chauds (soupapes d'échappement). C'est sur les isolants de bougie que l'on trouve la plus grande variété de combinaisons, cet organe étant soumis à de très larges variations de températures.

Inconvénients des dépôts dans la chambre de combustion. - En dehors des effets purement physiques (réduction des échanges thermiques avec l'eau ou l'air de refroidissement, les dépôts constituant d'excellents calorifuges, réduction en volume de la chambre de combustion), les dépôts ont pour inconvénients majeurs :

a) Une baisse de puissance qui peut atteindre 5 à 10 % due à l'élévation de température de la charge, et aussi à la réduction de l'énergie d'allumage sous certaines conditions de fonctionnement (reprises).

b) L'augmentation des besoins en octane de nos voitures au fur et à mesure de leur encrassement; augmentation que nous avons chiffrée sur quelques voitures françaises et qui peut être de l'ordre de 6 à 12 points au bout de 20 000 km. Il est d'ailleurs curieux d'observer que ce besoin peut diminuer ensuite après une période de mauvais fonctionnement, avec un auto-allumage accentué, qui aura pour effet un nettoyage partiel des dépôts.

c) La détérioration des soupapes d'échappement dont nous vous avons expliqué le mécanisme par effet mécanique et corrosion.

d) Enfin l'apparition de combustions anormales : auto-allumage, pré-allumage, différentes de la détonation normale, mais amplifiant celle-ci, génératrice de baisse de rendement et de bruits.

Je pense qu'il est nécessaire de vous donner quelques explications sur ce dernier inconvénient majeur des dépôts dans la chambre de combustion.

Les combustions anormales - pré-allumage par dépôts incandescents. - Le pré-allumage caractérise toute combustion anormale se produisant avant l'étincelle, la cause en est généralement les dépôts restés à l'incandescence, plus rarement la surface chaude ou le point chaud (soupape d'échappement ou électrode centrale de la bougie).

Ce phénomène de pré-allumage, essentiellement distinct du cliquetis qui est un auto-allumage en fin de combustion, a néanmoins tendance à augmenter celui-ci au même titre d'ailleurs qu'une augmentation d'avance. Les deux phénomènes s'auto-excitent l'un l'autre, s'il y a pré-allumage le cliquetis augmente, le moteur chauffe, par conséquent l'incandescence augmente et le moteur pré-allume plus tôt, etc. Le pré-allumage est beaucoup moins curable par l'indice d'octane que le cliquetis et constitue une limite à l'élévation des taux de compression.

Les voitures françaises en général ne souffrent pas encore de cette anomalie de combustion, par contre les voitures américaines sont déjà dans la zone critique et en souffrent grandement. Mais nos voitures françaises peuvent souffrir du pré-allumage aux grandes allures : après une longue course, par temps chaud, le moteur pré-allume sans bruit d'abord et sans que le conducteur ne s'en aperçoive que par une certaine gêne dans le fonctionnement et une légère baisse de puissance, ensuite accompagné de bruits sourds à basse fréquence auxquels il ne fera peut-être pas attention. Tout se passe comme si à l'avance maxima où il se trouve il avait encore ajouté un excès d'avance.

Cas des moteurs d'aviation. - Les moteurs d'aviation supportent aisément des proportions de plomb beaucoup plus fortes que l'automobile et pouvant aller jusqu'à 1,6 $cm^3$ ‰. Ceci tient, d'une part, à ce que les régimes de température sont plus réguliers et, d'autre part, à ce que les questions de prix de revient interviennent moins que pour l'automobile : les soupapes sont en aciers spéciaux et refroidies au sodium, solutions trop onéreuses pour l'automobile.

## EVOLUTION DE LA NOTION D'INDICE D'OCTANE

Les Américains, promoteurs des méthodes de classement des carburants par indice d'octane, ont à l'origine cherché une méthode de laboratoire qui donnait aux carburants le même classement par valeurs antidétonantes que celui effectué sur leurs moteurs réels de l'époque; c'est l'origine de la Motor method $F_2$ dont les conditions d'essais ont été choisies empiriquement (900 tours - 150°C à l'admission) en ayant seulement en vue la bonne corrélation des classements sur moteurs réels et sur moteurs de laboratoire. Cette méthode, bien qu'établie pour les moteurs américains, a été adoptée universellement et en particulier par la France, bien que la construction des moteurs français différait radicalement de la construction américaine. C'est ce qui explique les anomalies constatées au temps de la Motor method où il n'était pas rare de cliqueter davantage avec un carburant étiqueté 75 qu'avec un étiqueté 73. C'était là un grave défaut de la méthode.

En vingt ans, les moteurs américains ont évolué, et les chercheurs s'aperçurent bientôt que la corrélation, bonne à l'origine, devenait aléatoire sur les moteurs modernes. Il fallut donc changer la méthode de mesure et on adoptait la Research method $F_1$ qui donnait une meilleure corrélation avec les moteurs réels modernes.

Comme il n'était pas question de changer le moteur CFR d'essais même, déjà répandu dans le monde entier à des milliers d'exemplaires, on se contenta de changer les conditions d'essais et ceci tout à fait empiriquement (600 tours), dans l'unique but d'avoir une bonne corrélation avec les moteurs réels de l'époque.

La France adopta à son tour la Research method $F_1$ qui, par chance, correspondait bien mieux que la "Motor" à ses moteurs.

En fait, les méthodes de mesure d'indice d'octane sont absolument empiriques et on peut penser que d'ici quelques années, la construction des moteurs ayant encore évoluée, il y aura lieu d'adopter une nouvelle méthode mieux adaptée à la construction du moment.

## Variation de la valeur antidétonante avec le régime du moteur. Sensibilité

On sait que la détonation est influencée par beaucoup de facteurs, notamment par la pression (ou concentration en oxygène), par la température, par la richesse du mélange carburé, par l'avance à l'allumage, etc. Or, tous ces facteurs varient avec le régime du moteur, par exemple lors d'une accélération à pleine ouverture, et il s'ensuit que la valeur antidétonante réelle du carburant varie avec le régime, et que, pour des carburants de mêmes indices (Motor ou Research), les uns avaient tendance à cliqueter dans les bas régimes du moteur, et d'autres au contraire dans les hauts régimes.

Il devenait difficile de caractériser la valeur antidétonante d'un carburant par un seul chiffre (indice d'octane),mais mieux par une courbe. On a été ainsi conduit à la notion de "valeur antidétonante route".

Une courbe ne pouvait être définie par un seul point; on juge maintenant mieux de la valeur antidétonante d'une essence par deux chiffres : l'un constitué par l'indice d'octane Motor $F_2$ qui donne une idée de la tenue du carburant dans les régimes élevés du moteur, l'autre constitué par l'indice d'octane Research $F_1$ qui donne une idée de sa teneur dans les bas régimes.

La différence Research - Motor ou $F_1 - F_2$ constitue ce qu'on appelle la "sensibilité du carburant". A même indice d'octane Research, le carburant se comportera d'autant mieux dans les faibles régimes que sa sensibilité $F_1 - F_2$ sera plus élevée; ce dernier point est très important puisque les moteurs français ont surtout tendance à cliqueter dans les bas régimes.

La "sensibilité" d'un carburant est en relation avec sa composition, donc avec le mode de traitement, les hydrocarbures paraffiniques ont une très faible sensibilité (parfois négative avec $F_1 < F_2$), les aromatiques ont une grande sensibilité (jusqu'à 12 et 14 points). Ils sont en quelque sorte "pénalisés" par la Motor method.

Cette réserve une fois faite sur la valeur très relative d'une seule mesure d'indice d'octane (Motor ou Research), ajoutons que l'on cherche actuellement à mettre au point des "méthodes route" qui peut-être remplaceront un jour la mesure classique actuelle en laboratoire. Celle-ci, malgré ses imperfections, reste pour le moment la seule utilisée, et il faut avouer que jusqu'à présent toutes les méthodes route restent extrêmement décevantes en ce qui concerne la constance

et la reproductibilité des résultats. Elles sont néanmoins extrêmement utiles pour la détermination des sens de variations et pour l'étude du comportement d'un carburant tout au long d'une courbe d'accélération.

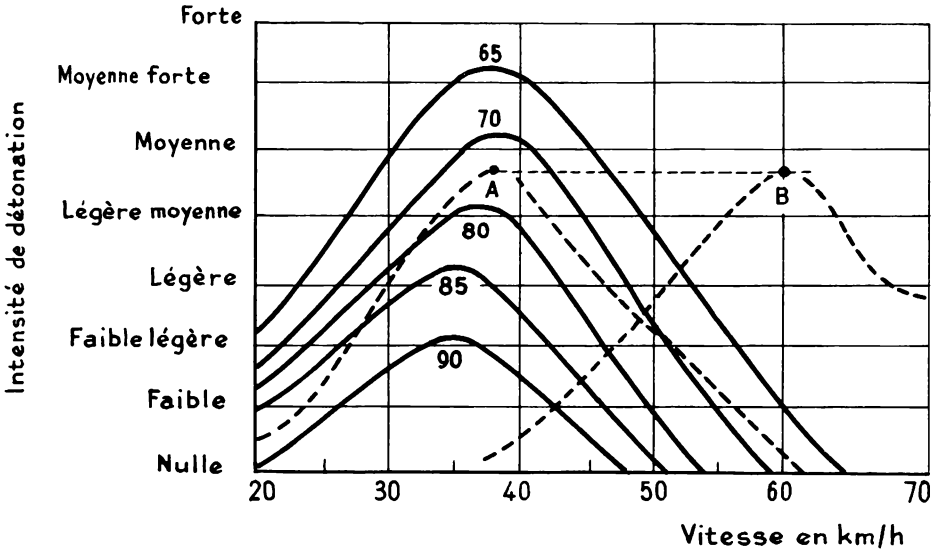
## Valeur antidétonante route des carburants

Les méthodes qui vont suivre font toutes appel au même principe de comparaison du carburant x à essayer à des mélanges heptane et isooctane dans les moteurs réels lors d'une accélération en prise directe, sur route plate et sans vent. On peut obtenir soit toute la courbe des valeurs antidétonantes en fonction de la vitesse de la voiture, soit un point de cette courbe qui sera l'indice d'octane route. Mais pour que cet indice ait une signification, il est nécessaire de bien spécifier la vitesse.

Cette vitesse est pour l'instant assez mal définie, ce qui entraîne une certaine confusion dans les comparaisons d'indices route. Une définition précise et une standardisation précise des méthodes route s'impose.

### Méthode Uniontown

Les premiers essais américains Uniontown de valeur antidétonante route caractérisaient cette valeur par l'intensité maxima de




Indice route "Uniontown"

détonation. Ils étaient effectués avec le réglage normal de la voiture et sans toucher au dispositif d'avance. On accélérait à fond à partir d'une vitesse constante et on enregistrait à l'oreille l'intensité de cliquetis en fonction de la vitesse de la voiture. On opérait de la même manière pour les carburants de référence d'indice d'octane Motor method connus, ce qui constituait en quelque sorte le "canevas" de référence, et pour le carburant A ou B dont on voulait déterminer la valeur "route". On obtenait les courbes suivantes (fig. p. 131).

Par cette méthode, les deux carburants A et B étaient classés tous deux avec 74 comme indice route, sans tenir compte de la différence de régime à laquelle se produisait la détonation. L'usager, lui, classait mieux l'essence B que l'essence A, par le fait que le cliquetis est beaucoup plus gênant dans les faibles allures. L'essence A, du type saturé, a un indice Motor de 71, son indice route est de 74 et son indice Research de 73, soit une sensibilité de 2 points. L'essence B, du type non saturé, a un indice Motor de 70, un indice route de 74 et un indice Research de 80, soit une sensibilité de 10 points.

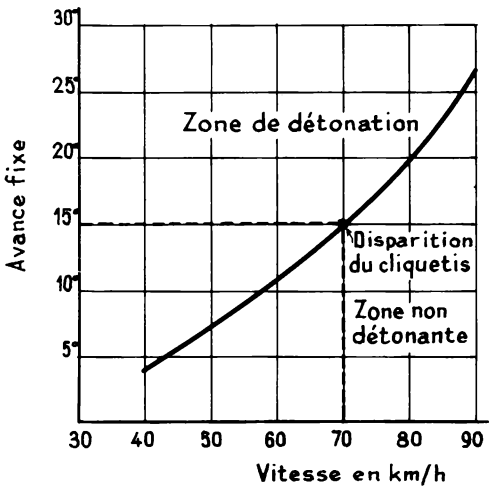
Cette méthode n'ayant pas donné satisfaction, les Américains en ont mis une autre au point, faisant intervenir le régime du moteur; c'est la méthode dite "des courbes frontières".

Méthode des courbes frontières

Principe de la méthode. - Après suppression du dispositif d'avance automatique sur une voiture, on effectue l'essai suivant pour différentes valeurs de l'avance fixe, sur route plate ou en pente légère :

Partant en prise à vitesse réduite, on accélère à fond. Le moteur se met à cliqueter et la vitesse s'accélère. On note la vitesse ou le régime auquel le cliquetis disparaît. On peut ainsi tracer par points la courbe frontière :

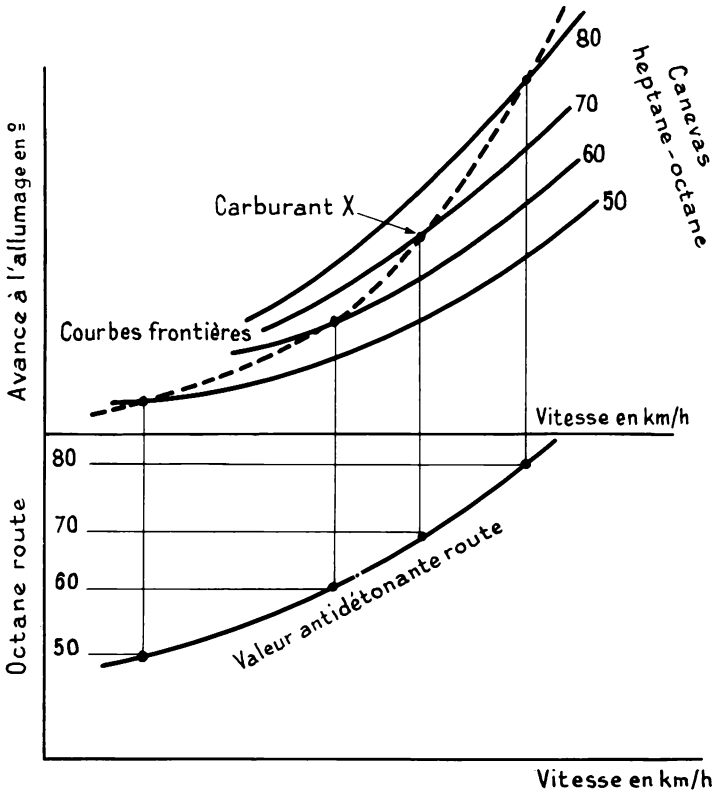
C'est ainsi que pour une avance fixe de 15° le cliquetis disparaît à 68 km/h. La courbe ainsi tracée est dite "frontière" parce qu'elle partage le plan en deux zones distinctes, l'une avec et l'autre sans détonation.




Courbe frontière

Détermination de la valeur antidétonante route.- On opère comme précédemment avec une voiture déterminée et on trace les courbes frontières relatives à des mélanges heptane-isooctane étalons. Ceci constitue le canevas étalon relatif à la voiture. La détermination de la valeur antidétonante d'un carburant (X) consiste simplement à déterminer sa courbe frontière et à la situer sur le canevas.

On en déduit immédiatement la valeur antidétonante route du carburant à mesurer. Cette courbe est à la fois caractéristique du carburant et de la voiture. Pour la rendre indépendante de la voiture, il y aurait lieu de tracer ces courbes pour quelques voitures représentatives du marché français et de choisir comme celle caractérisant le carburant soit la courbe moyenne, soit la plus désavantageuse.

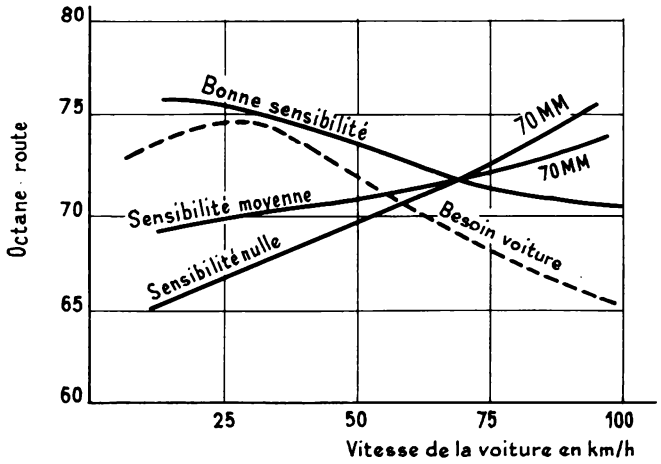



Valeur antidétonante route

L'allure de la courbe de valeur antidétonante en fonction du régime dépend de la constitution chimique du carburant. En général, les carburants commerciaux courants, d'origine paraffinique, ont une valeur antidétonante plus faible dans les bas régimes que dans les hauts régimes, cette courbe tend à s'aplatir au fur et à mesure que

les indices d'octane des carburants commerciaux montent (proportion plus forte d'aromatiques). Elle peut même être inversée pour certains carburants (oléfines en tête de distillation, aromatiques dans le milieu et paraffine en queue de distillation). En général, il y a une relation entre la position dans le plan de la courbe et la sensibilité du carburant $F_1 - F_2$.

Relation entre la sensibilité et la valeur antidétonante route. - La figure ci-dessous montre que l'augmentation de la sensibilité d'une essence a tendance à relever la valeur route dans les bas régimes du moteur, c'est-à-dire là où l'on en a le plus besoin.



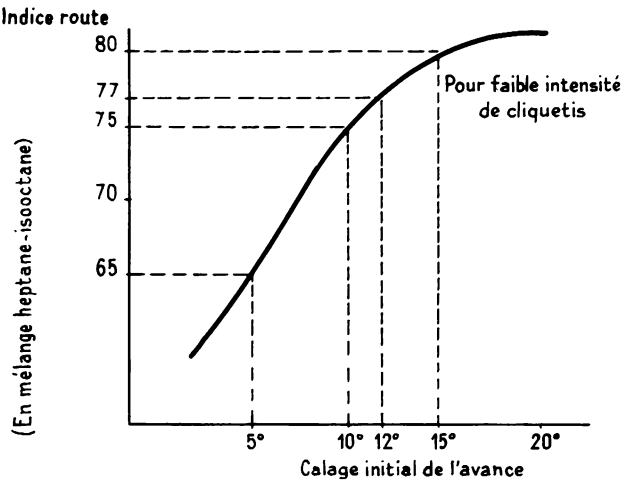

Relation entre "sensibilité" et valeur route

On peut reprocher aux deux méthodes mentionnées ci-dessus : Uniontown et courbes frontières un manque de reproductibilité dans les résultats par modification du régime thermique du moteur en cas d'avance à l'allumage excessive, ces deux méthodes ont donc été perfectionnées pour pallier ces inconvénients.

Méthode Uniontown modifiée

Dans cette méthode, on laisse en place les dispositifs d'avance du constructeur avec ses réglages normaux, et on fait varier, pour différents carburants étalons, le calage initial de l'avance, de manière à obtenir une faible intensité de cliquetis sans tenir compte de la vitesse. On obtient ainsi la courbe ci-après.

Pour déterminer l'indice route d'un carburant quelconque, on cherche de la même façon que pour les carburants étalons l'avance




Détermination de la valeur antidétonante route par la méthode "Uniontown" modifiée

initiale correspondant à une faible intensité de cliquetis et en rappelant sur la courbe on obtient un indice route.

Exemple. - Si le carburant donne une faible intensité de cliquetis pour 12 d'avance initiale, son indice route est de 77.

Il est utile avec cette méthode de noter pour chaque point de la courbe la vitesse à laquelle se produit le cliquetis.

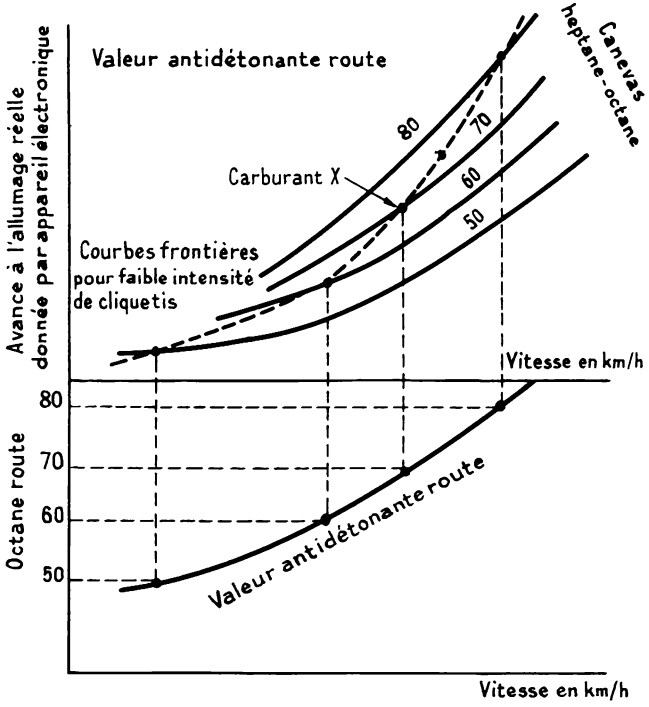
Méthode des courbes frontières modifiée

On garde également, dans ce cas, le dispositif d'avance du constructeur. La valeur de l'avance peut être connue à tous les régimes, grâce à un appareil électronique branché sur le distributeur.

Cette méthode consiste à tracer pour différents carburants étalons la courbe d'avance réelle en fonction du régime pour une intensité de cliquetis naissant. Trois opérateurs sont nécessaires à bord de la voiture : le conducteur qui accélère à fond et qui donne des "tops" pour différentes vitesses, un deuxième opérateur qui fait varier le dispositif d'avance à main de manière à conserver un cliquetis faible pendant toute la durée de l'essai, enfin un troisième opérateur qui enregistre les avances réelles données par l'appareil électronique à chaque "top" de vitesse du conducteur. En répétant cet essai pour différents carburants étalons, on trace un canevas analogue à celui de la méthode des courbes frontières (fig. de la p. 136).

La détermination de la valeur antidétonante route d'un carburant s'obtient comme précédemment en superposant sur ce canevas celle du carburant à mesurer.

Cette méthode, quoiqu'en apparence un peu compliquée, est maintenant couramment utilisée aux Etats-Unis et permet dans un temps donné un beaucoup plus grand nombre de mesures. Elle peut être




Détermination de la valeur antidétonante route par la méthode des courbes frontières modifiée

d'ailleurs simplifiée par des appareils automatiques enrègistrant l'avance en fonction des "tops" de vitesse. Une fois la courbe obtenue, on peut, si besoin est, caractériser la valeur antidétonante route non plus par une courbe, mais par un chiffre, en prenant sur la courbe la valeur en octane correspondant à l'ordonnée 35 km à l'heure. Ce chiffre de 35 km à l'heure est d'ailleurs choisi d'une manière empirique mais correspond sensiblement à la réaction du client, qui, la plupart du temps, juge de son carburant à la reprise dans les bas régimes, soit aux environs de 35 km à l'heure.

Autre méthode

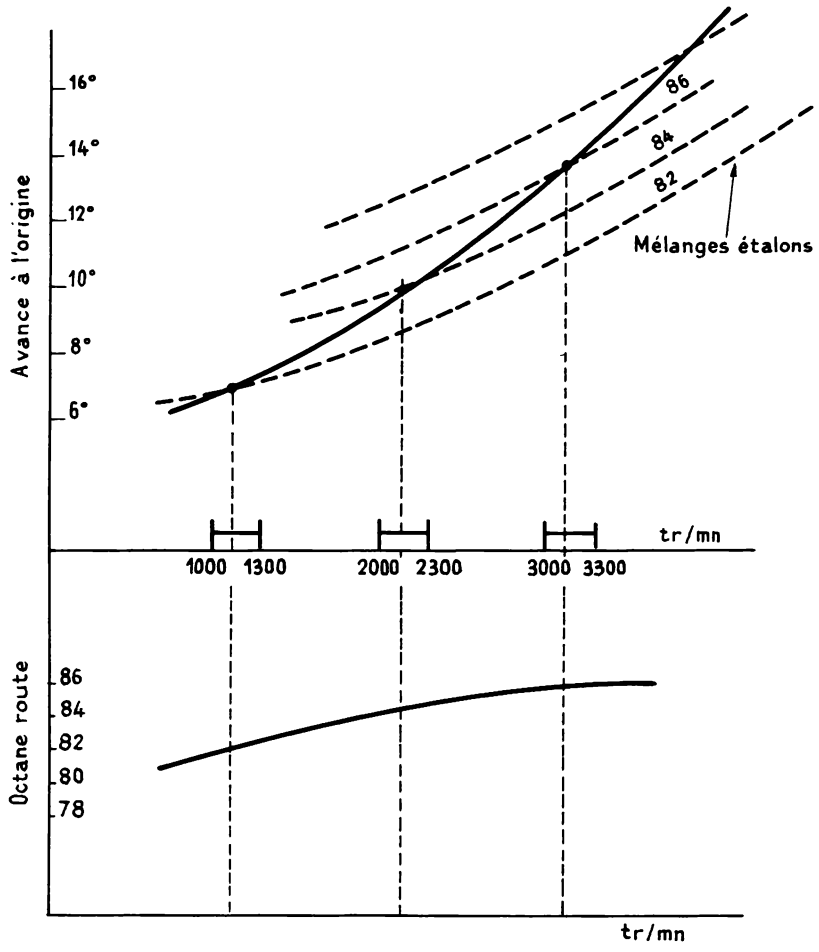
Une autre méthode, utilisée en Angleterre, a été appliquée à la détermination des indices route.

On laisse les dispositifs de variation d'avance de la voiture. On peut faire varier l'avance à l'origine depuis l'intérieur de la voiture par un levier de commande à main. Cette avance pouvant être lue avec précision sur un cadran fixé sous le distributeur.

L'essai consiste à chercher l'avance à l'origine pour un cliquetis léger dans trois plages de vitesses de moteur différentes :

1 000-1 300 tours, 2 000-2 300 tours, 3 000-3 300 tours.

On détermine ainsi les courbes d'avance par trois points ou plages, tant pour les carburants d'essais que pour les carburants étalons; on obtient les courbes suivantes :



Les indices route sont obtenus comme pour la méthode des courbes frontières par interpolation entre les carburants étalons.

Cette méthode a pour inconvénient, par rapport à celle des courbes frontières modifiées :

a) D'être obligé de descendre de voiture et de soulever le capot à chaque point de détermination de la courbe;

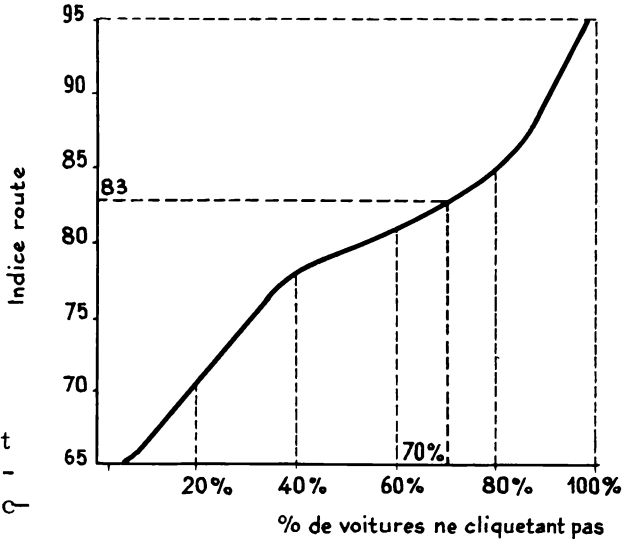
b) De ne pas faire apparaître un dérangement possible de la loi d'avance en fonction du régime (on lit l'avance à l'origine et non l'avance réelle);

c) De créer des discontinuités dans l'attention de l'opérateur qui cherche le début de cliquetis (trois manœuvres de recherches au lieu d'une continue);

d) La mesure des indices d'octane route élevés, peut conduire à des avances excessives si le taux de compression n'est pas suffisant; l'interpolation dans ces conditions est discutable.

Méthode des pourcentages

Une autre méthode statistique, utilisée aux Etats-Unis, consiste à juger d'un carburant par tout ou rien : ou il cliquette, ou il ne cliquette pas, et ceci indépendamment du régime.




Détermination de la valeur antidétonante route par la méthode des pourcentages

On dispose d'un parc de 100 voitures de toutes marques, de tous âges; on compte le nombre de voitures qui ne cliquettent pas avec différents carburants étalons d'indice d'octane connu et on trace, en fonction des indices d'octane, la courbe de pourcentage des voitures ne cliquetant pas. On a trouvé, par exemple, qu'avec un carburant étalon à 80 d'octane, 70 % des voitures ne cliquettent pas.

Pour évaluer l'indice route d'un carburant donné, on l'essaie dans les 100 voitures en question, on compte le nombre de voitures qui ne cliquettent pas et on rappelle sur la courbe.

## Conclusion sur les différentes méthodes de mesure d'indice route

La méthode Uniontown modifiée semble devoir être utilisée par les raffineurs pour caractériser la valeur antidétonante route d'un carburant par un chiffre. Sa détermination est assez rapide et ne nécessite pas un appareillage coûteux.

La méthode des courbes frontières modifiée semble devoir être utilisée par les constructeurs pour l'étude des lois d'avance et par les raffineurs pour l'étude de l'allure des courbes des valeurs antidétonantes en fonction de la vitesse; elle est précieuse, notamment pour la recherche ou pour la sélection de certains hydrocarbures susceptibles d'augmenter la valeur antidétonante dans les bas régimes. Elle a pour inconvénient de nécessiter un appareillage électronique assez coûteux donnant constamment l'avance réelle pendant toute la durée de l'essai. Elle nécessite, en outre, trois opérateurs entraînés à bord de la voiture d'essai.

La méthode des pourcentages est extrêmement séduisante par sa simplicité, mais c'est une méthode de "riches" difficilement applicable en France, sauf peut-être pour l'étude d'un carburant déterminé avant lancement sur le marché.

### Précision des méthodes de mesure d'indice route

L'indice d'octane route d'un carburant devrait être une caractéristique propre au carburant, indépendante de la voiture dans laquelle il a été mesuré.

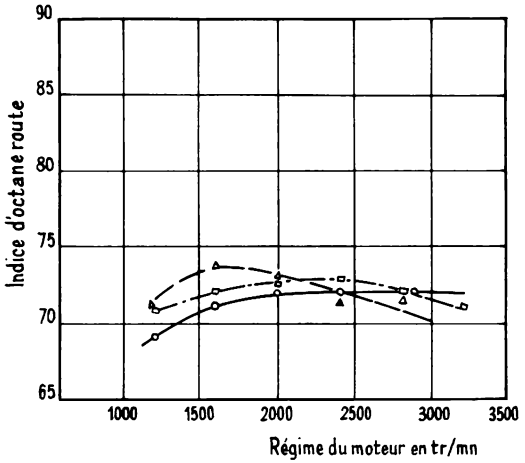
En réalité,il n'en est pas ainsi et le type de voiture, son encrassement, sa sévérité interviennent dans une assez large mesure.

Une autre cause d'imprécision réside en le manque de définition précise de cet indice et notamment de la vitesse (kilomètres à l'heure ou régime du moteur) à laquelle la mesure doit être effectuée.

A notre avis, la vitesse devrait être celle minima où l'on peut descendre raisonnablement en prise avant de changer de vitesse, la reprise à pleine ouverture devant se faire sans à-coup dans la transmission, ce sera par exemple 40 km à l'heure pour un 4 cylindres, 30 km à l'heure pour un 8 cylindres.

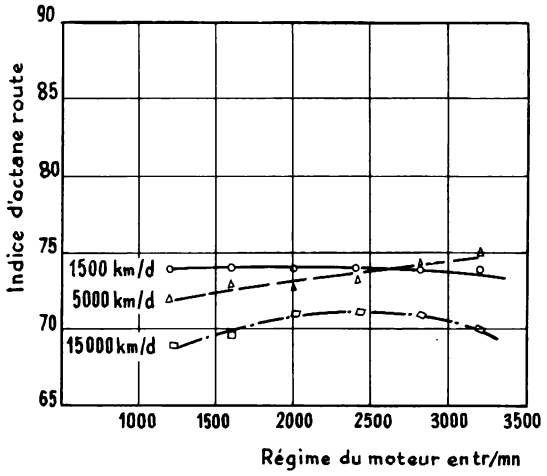
Certains préconisent de prendre le maximum de la courbe quand elle en a un. Mais souvent ce maximum se produit au-dessous du régime où l'on doit normalement changer de vitesse et l'adoption de cette valeur correspond à une faute de conduite flagrante.

Les courbes ci-contre nous donnent une idée de la précision à attendre de la meilleure des méthodes qui nous semble être celle des courbes frontières modifiée.




Courbes d'indice d'octane route d'un carburant relevées sur trois véhicules de même type

Le premier de ces diagrammes donne les indices route d'un même carburant 75 Research (10 % de naphtènes, 12,5 % d'aromatiques, 13 % d'oléfines, 64,5 % de paraffine) mesurés dans des voitures de même type, ayant sensiblement le même kilométrage.




Courbes d'indice d'octane route d'un carburant relevées sur le même véhicule ayant différentes importances de dépôts

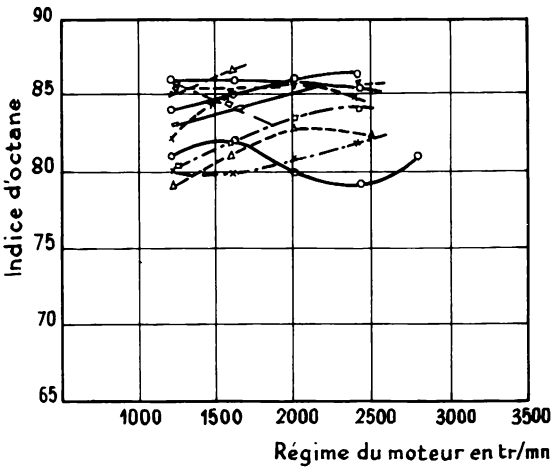
La différence observée de 5 points (69 à 74) est due aux différences de réglage existant sur les voitures de série.

Le diagramme ci-contre donne toujours pour le même carburant les indices route mesurés sur une même voiture ayant des kilométrages différents.

Les différences observées de 6 points (69 à 75) proviennent des degrés d'encrassement différents de la chambre de combustion.

Le diagramme ci-contre donne les indices route d'un même carburant sur des voitures différentes ayant sensiblement le même kilométrage.

Les différences observées sont de 7 points (79 à 86).




Courbes d'indice d'octane route d'un carburant relevées sur différents véhicules

## Besoin en octane d'une voiture

Le besoin en octane d'une voiture est l'indice d'octane minimum d'un carburant exprimé en mélange étalon avec lequel le moteur ne cliquette à aucun régime.

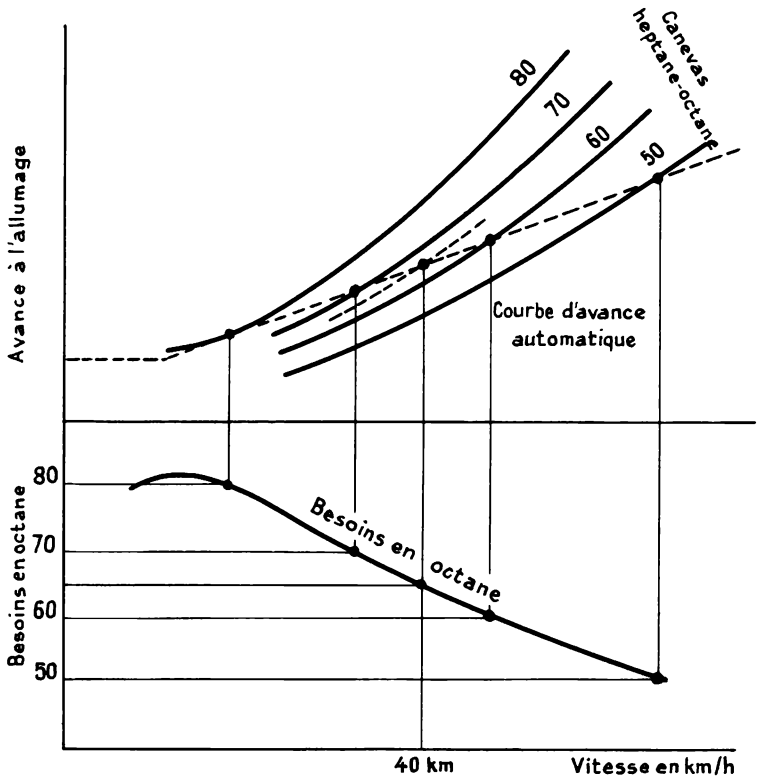
Indiquons tout de suite que ce besoin en octane n'est pas une constante, il est susceptible de variations que nous étudierons p. 142. C'est une caractéristique qui dépend pour la plus grande part du moteur, mais malheureusement aussi un peu du carburant et en particulier de sa composition.

Cette notion de besoin en octane découle directement de la méthode analysée précédemment des courbes frontières.

Si, sur le canevas étalon des courbes frontières obtenues soit par la méthode normale, soit mieux encore par la méthode modifiée, nous superposons la courbe d'avance à l'allumage du distributeur en fonction du régime, nous obtenons par rappel des points d'intersection la courbe des besoins en octane de la voiture, cette courbe est aussi une courbe frontière qui sépare le plan en deux zones : celle du bas où les indices d'octane sont insuffisants et où la voiture cliquette, et celle du haut où il n'y a plus de cliquetis.

La connaissance de cette courbe de besoin en octane est extrêmement utile comme nous le verrons ci-dessous pour résoudre le problème de l'adaptation du carburant à la voiture, problème autour duquel gravite toute la politique d'investissement de l'industrie du pétrole et aussi celle des constructeurs de moteurs.

Avant d'aborder ce problème nous passerons en revue les différentes méthodes de détermination du besoin en octane. Ces méthodes mènent soit à la connaissance de la courbe complète, soit à la connaissance d'un seul point qui peut être le maximum de la courbe ou bien déterminé empiriquement à une certaine vitesse comme pour la mesure des valeurs antidétonantes des carburants.




Besoins en octane d'une voiture

Recherche des besoins en octane d'une voiture déterminée

## Méthodes de mesures du besoin en octane d'une voiture

### Méthode des courbes frontières

Comme nous venons de l'expliquer dans le paragraphe précédent, soit par la méthode normale avec avance fixe et disparition du cliquetis, soit avec celle des courbes frontières modifiée avec l'avance réelle au cliquetis naissant. Cette dernière méthode est préférable à la première et donne des résultats plus reproductibles.

Cette méthode nécessite la connaissance de la loi d'avance à l'allumage en fonction du régime.

La courbe de besoin en octane s'obtient, comme nous l'avons vu, en superposant cette loi d'avance au canevas étalon des courbes frontières.

### Méthode CRC - E 1 - 943

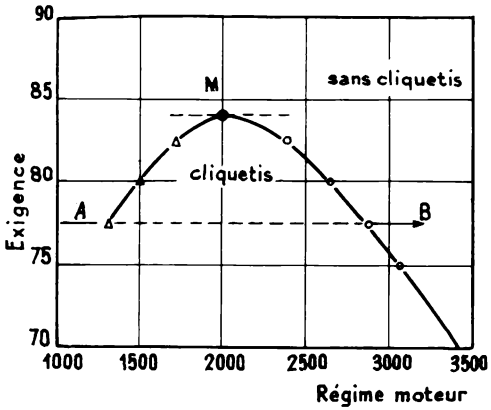
Méthode où l'on étudie les variations de l'intensité de cliquetis en fonction de la vitesse. Nous ne mentionnerons cette méthode que pour mémoire étant donné sa complication et son manque de reproductibilité.

### Méthode CRC - E 1 - 748

Cette méthode consiste à repérer, pour différents carburants étalons, les régimes d'apparition et de disparition de cliquetis lors d'une accélération. La plage de cliquetis se resserre au fur et à mesure que les indices des carburants étalons croissent. La courbe obtenue passe pour un maximum qui constitue l'exigence maxima de la voiture.

Un perfectionnement à cette méthode consiste, lors de l'accélération à plein gaz, à lever le pied aussitôt que le cliquetis est apparu et de remettre à pleine ouverture avant le point B de disparition; on évite ainsi l'inconvénient de changer le régime thermique

de la culasse par un cliquetis exagéré entre A et B.



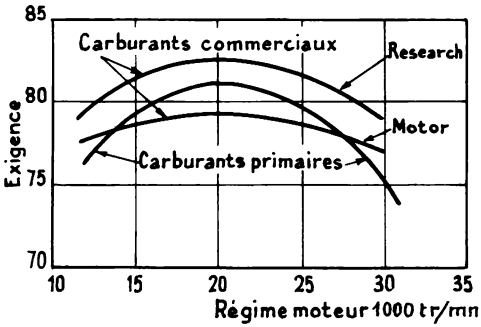
Exigence en octane CRC-E1-748

Une méthode dérivée de la précédente et essentiellement pratique consiste en la seule détermination du maximum de la courbe en partant de carburants commerciaux d'indice Research connu et décroissants de 2 en 2 points, ces carburants étant essayés successivement en partant des indices les plus élevés et ceci à pleine admission.

On obtient le point M par encadrement entre le dernier carburant qui ne cliquette pas et le premier qui cliquette légèrement.

## Besoin en octane avec les carburants du commerce

Si l'on effectue le besoin en octane d'une voiture, d'une part, avec les carburants primaires et, d'autre part, avec des carburants du commerce, ces derniers étant évalués soit par leur valeur Motor, soit par leur valeur Research, on obtient la figure ci-contre.



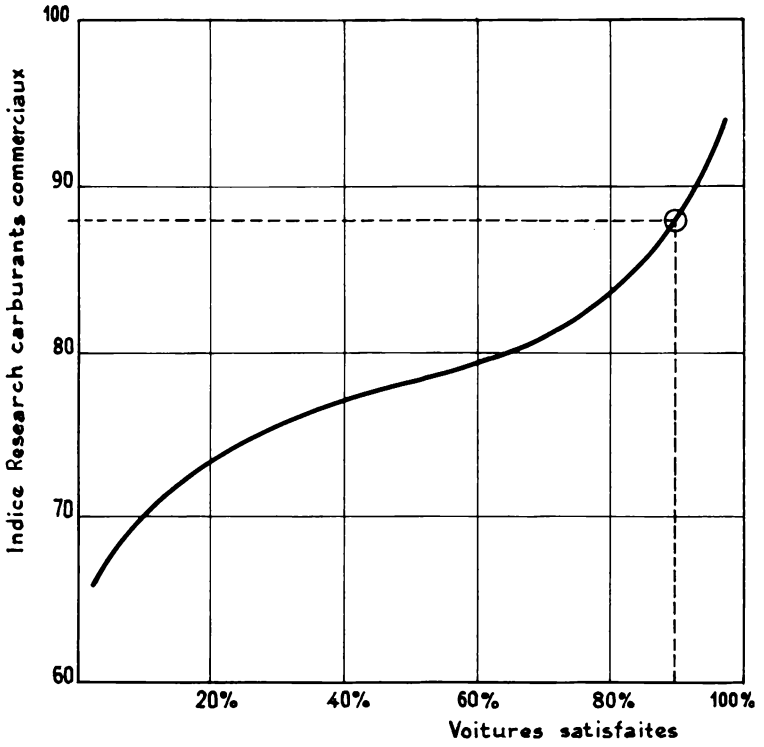
Exigence en octane étudiée avec des carburants commerciaux

On voit que l'exigence comptée en carburant primaire se situe entre les exigences en Research et les exigences en Motor.

## Etude du besoin en octane d'un parc

Cette méthode consiste à prendre un assez grand nombre de voitures 100 ou 200, de différentes marques et de différents âges (par exemple en se limitant à une ancienneté de cinq ans). Ce parc réduit étant supposé être représentatif du parc d'ensemble. On passe dans

toutes ces voitures un certain nombre de carburants commerciaux courants d'indice Research connu, échelonné de 2 en 2 points. On note pour chaque carburant le pourcentage de voitures satisfaites qui ne cliquettent absolument pas.




Détermination du besoin en octane d'un parc

Si l'on veut par exemple que 90 % des voitures soient satisfaites, il y aura lieu, pour les raffineurs, de distribuer un 88 d'octane Research.

Remarque.- Les résultats de la méthode ci-dessus ne sont pas exploitables si l'on opère sur des carburants étalons. Le comportement de ceux-ci purement paraffiniques est très différent à indice équivalent à nos carburants commerciaux actuels riches en aromatiques. Les résultats obtenus par cette méthode ne sont valables que pendant assez peu de temps (par exemple deux à trois ans) ce qui suffit grandement étant donné l'évolution rapide de nos carburants et de nos voitures.

Précision-reproductibilité des méthodes de mesure du besoin en octane

Des méthodes différentes mentionnées ci-dessus, c'est la CRC E 1-748 qui donne les meilleurs résultats.

Dans des conditions atmosphériques strictement identiques, la méthode s'avère reproductible à 1 point près.

Variations des exigences en octane d'une voiture

Les exigences en octane varient avec un certain nombre de facteurs :

a) Influence des conditions atmosphériques. - La pression, la température, l'état hygrométrique exercent une influence sur le besoin en octane; cette influence est plus forte dans les hauts régimes; elle est réduite dans les bas régimes qui sont précisément les plus intéressants.

En fait, on peut compter une augmentation de 1 point pour 10°C d'augmentation de température.

b) Influence du calage de l'avance. - 1. Voiture neuve. La came carrée commandant les vis platinées n'est jamais parfaite. Les différences enregistrées entre deux allumages peuvent être de 1 à 1,5° sur le distributeur, soit 3° sur le vilebrequin, ce qui se traduit par une variation de besoin en octane de 2 à 3 points.

Le constructeur a déterminé une loi d'avance idéale; il y a, bien entendu, des tolérances de fabrication et le contrôle accepte normalement ± 1,5° . La différence entre deux voitures de série peut donc être de 3° sur le distributeur, soit 6° sur le vilebrequin, soit une variation de besoins en octane de 5 à 6 points.

Ceci explique ce que l'on peut constater couramment sur deux voitures neuves surtout de chaîne et dont les besoins en octane peuvent différer de 7 à 8 points.

2. Voiture usagée. A l'usage les ressorts de masselottes de commande d'avance automatique se détendent et la loi d'avance ne se maintient pas dans le temps (trop d'avance dans les hauts régimes).

D'autres fois, le libre jeu du masselotier est contrarié par du cambouis ou des impuretés solides, l'avance maxima se trouve ainsi réduite.

c) Influence des organes d'allumage. -

Bougie. L'utilisation d'un numéro de bougie plus froid que la bougie de série diminue d'environ 2 points le besoin en octane de la voiture.

Vis platinées. Le besoin en octane augmente avec l'écartement des vis platinées, environ 1 point pour 1/10 d'écartement en plus de la normale.

d) Influence du taux de compression. - Nous avons vu dans l'étude de l'indice d'octane cette influence; en fait, ce n'est pas uniquement le taux de compression qui est prépondérant mais bien la pression absolue en fin de compression, c'est dire que le remplissage intervient aussi.

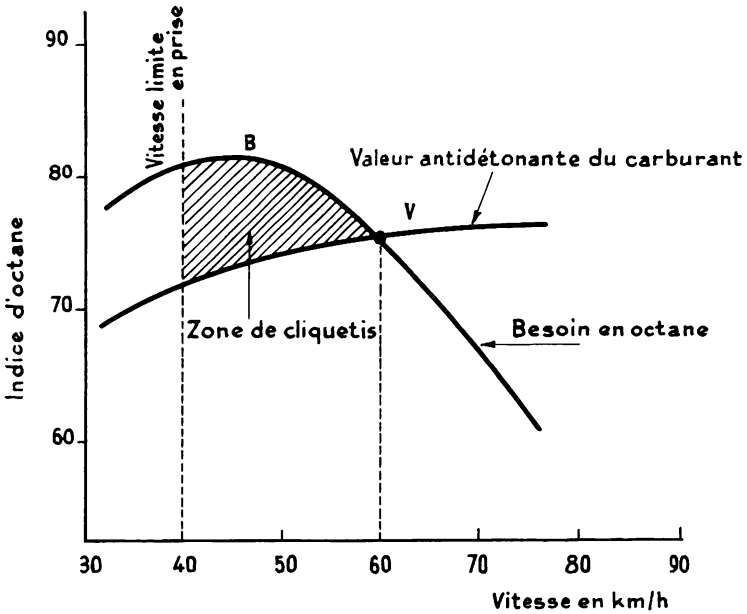
On compte très approximativement une augmentation de 10 points de besoin en octane par kilogramme de pression supplémentaire en fin de compression dans les bas régimes (300 tours).

e) Influence de l'encrassement du moteur. - Le besoin en octane augmente avec l'encrassement, donc avec le kilométrage de la voiture, cette augmentation varie dans de grandes proportions avec le carburant utilisé (beaucoup ou peu de plomb), avec l'utilisation de la voiture (ville ou route), avec la qualité d'huile utilisée, et enfin avec la perfection des apérages dans l'usinage du chemin et pistons.

L'augmentation de besoin en octane peut atteindre une dizaine de points d'octane en 30 000 km. Il est à noter cependant que cette augmentation du besoin en octane n'est pas indéfinie et qu'on peut observer une certaine stabilisation vers 30 000 ou 40 000 km.

## Problème de l'adaptation du carburant à la voiture

Nous avons étudié, d'une part, la "valeur antidétonante" du carburant, en fonction du régime, et, d'autre part, le "besoin en octane" de la voiture. La superposition sur un même diagramme de ce qu'"offre" le carburant et de ce que "demande" la voiture fait ressortir immédiatement les problèmes d'adaptation qui se posent.



Dans l'exemple de la figure, la voiture cliquétera jusqu'à 60 km à l'heure à pleine ouverture, au-delà, l'octane du carburant sera pléthorique.

Pour que la voiture ne cliquette à aucun moment, il faudra que la courbe V soit tout entière au-dessus de B.

Le problème de l'adaptation du carburant à la voiture consiste donc à faire coïncider le mieux possible ce que "donne" le carburant à ce que "demande" la voiture, d'où un double problème pour le raffineur et le constructeur qui doivent s'efforcer, chacun dans leur domaine, de faire basculer les courbes dans le bon sens pour améliorer la coïncidence.

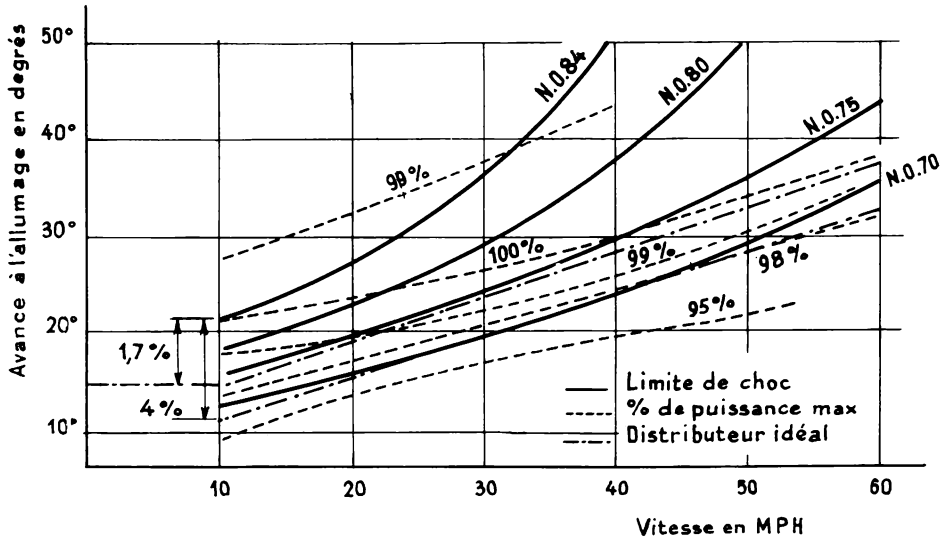
Problèmes du constructeur de moteurs

En dehors des études sur les culasses, les refroidissements et, en général, tous les problèmes mécaniques qui doivent être résolus pour réduire le besoin en octane et qui sortent du cadre de ce cours, il est un moyen sur lequel nous donnerons quelques explications, c'est celui de l'adoption d'une loi d'avance légèrement inférieure à celle qui donne la puissance maxima, quitte à maintenir de bonnes reprises et une consommation convenable pour adoption de l'avance à dépression.

Détermination de la loi d'avance à l'allumage. Compromis entre la puissance et le cliquetis. - Nous avons vu précédemment comment on déterminait, à l'aide du canevas des courbes frontières heptane-isooctane, le besoin en octane d'une voiture, en juxtaposant sur ce diagramme la loi d'avance en fonction du régime adopté par le constructeur. Cette loi, sensiblement linéaire pour les appareils centrifuges, peut ne pas correspondre aux avances de puissance maxima, si le constructeur, pour ne pas cliqueter ou pour rendre le cliquetis tolérable, a réduit sciemment son avance à l'allumage, consentant pour cela une perte de puissance généralement faible.

Ce point est mis clairement en évidence sur le diagramme suivant où l'on a juxtaposé, sur le canevas heptane-octane, non seulement la courbe d'avance du constructeur, mais aussi les courbes d'avance donnant 100 %, 99 %, 95 % de la puissance maxima (celle-ci déterminée au banc ou au châssis dynamométrique, avec un carburant à haut indice d'octane pour être certain de ne pas fausser la mesure par la détonation).

Dans l'exemple de la figure ci-après, il faut au carburant une valeur octane route de 84 au minimum si l'on ne veut cliqueter à aucun




Relation entre : besoin en octane, avance et puissance

régime tout en conservant la puissance maxima; la loi d'avance du constructeur devrait coïncider alors avec celle de la courbe 100 %.

La loi d'avance adoptée par le constructeur sur l'exemple de la figure permet le fonctionnement sans aucun cliquetis avec un carburant de valeur 75, soit 9 points de moins que précédemment, à la condition de consentir une perte de puissance de 1,7 % dans les bas régimes, ce qui est très faible, sans aucune perte de puissance dans les hauts régimes. Si cette même voiture devait fonctionner sans cliqueter avec une essence de valeur route 70, l'avance initiale devrait être abaissée à 11° , la perte de puissance serait alors de 4 % dans les bas régimes (soit une légère diminution de la qualité des reprises) et de 2 % dans les hauts régimes (diminution de la vitesse maxima de l'ordre de 2 km sur une Citroën 11 CV). Ces diminutions de performance, relativement légères, permettraient une réduction du besoin en octane de 84 à 70, soit 14 points, ce qui est considérable.

La connaissance de ce diagramme permet au constructeur de faire choix, en toute objectivité, de sa loi d'allumage et d'un compromis entre la puissance et la valeur route du carburant dont il dispose.

L'avance à dépression. Son influence sur le besoin en octane. - Tout ce que nous venons d'exposer a trait à la recherche de la loi d'avance idéale en fonction de la vitesse de rotation, et ceci pour la

pleine charge puisque c'est celle-ci qui est la plus défavorable au point de vue du cliquetis, mais il est évident que dans les charges réduites il existe, pour une ouverture donnée, une avance à l'allumage qui donne le maximum de puissance et le minimum de consommation. Cette avance est plus considérable que pour la pleine charge. La seule variation d'avance en fonction du régime, pour la pleine charge, ne permet pas de profiter des gains possibles avec des avances plus fortes dans les charges réduites qui, somme toute, sont les plus utilisées. Il y a donc lieu de faire varier l'avance, non seulement avec le régime, mais aussi avec la charge ou, ce qui revient au même, avec la dépression qui règne dans la tubulure d'admission.

L'adoption de cette avance à dépression permet au constructeur de choisir une loi d'avance à pleine admission en fonction du régime un peu moins sévère, c'est-à-dire de réduire son besoin en octane tout en rétablissant, par la dépression, les avances optima dans les charges réduites, ce qui aura une influence favorable sur la consommation.

L'adoption de l'avance à dépression réduit donc le besoin en octane et diminue la consommation.

Détermination de la loi d'avance à dépression. - Cette détermination doit se faire en plusieurs temps :

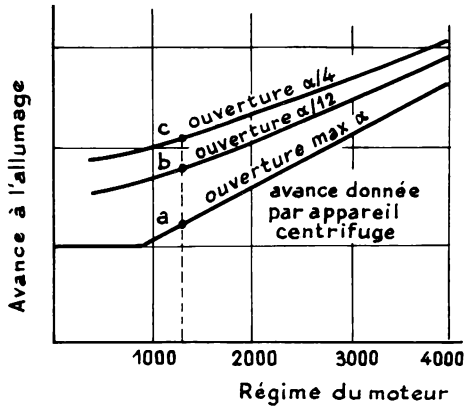
1. Dans une série d'essais préliminaires avec le distributeur centrifuge dont la loi d'avance a été choisie suivant le compromis mentionné ci-dessus (compromis, cliquetis-besoin, octane-puissance), on déterminera les dépressions dans la tubulure d'admission pour différentes vitesses de la voiture sur route plate.

2. On reproduira ensuite, soit au banc, soit sur châssis dynamométrique, les vitesses et les dépressions enregistrées dans les essais préliminaires. On mesurera la puissance correspondante.

3. Enfin, dans une troisième série d'essais, toujours au banc ou sur châssis dynamométrique, on conservera les puissances et vitesses constatées dans la deuxième série d'essais et l'on cherchera l'avance et l'ouverture du papillon qui donnent la consommation minima.

On aura donc déterminé ainsi les avances optima dans les charges réduites ou, ce qui revient au même, l'avance qui, à un régime donné et pour différentes dépressions, donne le rendement optimum au moteur. On peut donc tracer par points les courbes de la figure ci-après.

Il est évident que la capsule manométrique de commande d'avance à dépression devra compléter l'avance en fonction du




Détermination de l'avance en fonction de la dépression

régime à pleine admission de la différence des ordonnées "ab" ou "ac" suivant la charge.

Problèmes posés aux raffineurs pour l'amélioration de la valeur route des carburants

Nous avons vu précédemment que le problème d'adaptation du carburant à la voiture revenait à s'efforcer de faire coïncider les courbes de besoins de la voiture et la courbe des valeurs antidétonantes du carburant. Ceci posait un problème pour le constructeur qui devait s'efforcer de rendre un peu plus constants les besoins de sa voiture et un problème pour le raffineur qui devait s'efforcer de ramener sa courbe vers celle du constructeur.

Une remarque préliminaire est que si la courbe des besoins en octane du constructeur ne dépend que de la voiture, la courbe des valeurs antidétonantes du raffineur varie avec la voiture utilisée. Il y a lieu, dans ce cas, de déterminer cette courbe sur plusieurs voitures et de prendre la courbe moyenne qui sera alors considérée comme caractéristique du carburant seul.

Les quelques essais déjà effectués sur les voitures françaises ne nous permettent pas encore de tirer des conclusions valables. Force nous est donc de nous référer aux essais américains. On peut tirer de ces essais les quelques indications suivantes :

1. Pour les carburants de type saturé, les essences straight-run par exemple, la détonation est sévère aux faibles vitesses; par contre, ces carburants se comportent bien dans les vitesses élevées.

2. Au contraire, les carburants fortement non saturés (reforming, cracking) présentent de bonnes caractéristiques de détonation aux faibles vitesses, mais de mauvaises aux vitesses élevées.

3. La composition chimique des fractions à bas points d'ébullition a une importance primordiale sur la détonation aux faibles vitesses.

4. La composition des fractions lourdes détermine, pour une large part, la résistance à la détonation pour les fortes vitesses et la bonne susceptibilité au plomb.

5. Les aromatiques n'interviennent que peu dans les bas régimes, étant donné leur point d'ébullition relativement élevé.

6. Un carburant particulièrement bien adapté aux voitures actuelles devra être très oléfinique dans ses fractions légères, paraffinique dans ses fractions lourdes, et aromatique dans ses fractions moyennes.

Applications au raffinage. - Les Américains ont examiné comment les divers procédés de raffinage permettaient de réaliser la double condition mentionnée ci-dessus. Il résulte de leurs observations :

1. La distillation directe qui donne normalement beaucoup de paraffines dans les fractions légères, fournit un carburant qui se comportera très mal sur route aux bas régimes (qui sont les plus importants).

2. Le cracking thermique en phase mixte donne bien des oléfines, mais celles-ci se répartissent uniformément de sorte que leur effet bienfaisant dans les légers est compensé en partie par leur effet malfaisant dans les lourds. En fait, ces essences se comportent un peu mieux sur route que les essences de distillation.

3. La polymérisation catalytique ne donne, en fait, pas de produits légers et des oléfines dans les lourds. Le carburant se comporte donc assez mal sur route.

4. L'hydroforming donne des fractions de tête presque entièrement paraffiniques et des fractions lourdes oléfiniques, ce qui est tout le contraire de ce que l'on voudrait avoir. Le comportement sur route sera mauvais, et ceci malgré une excellente susceptibilité au plomb.

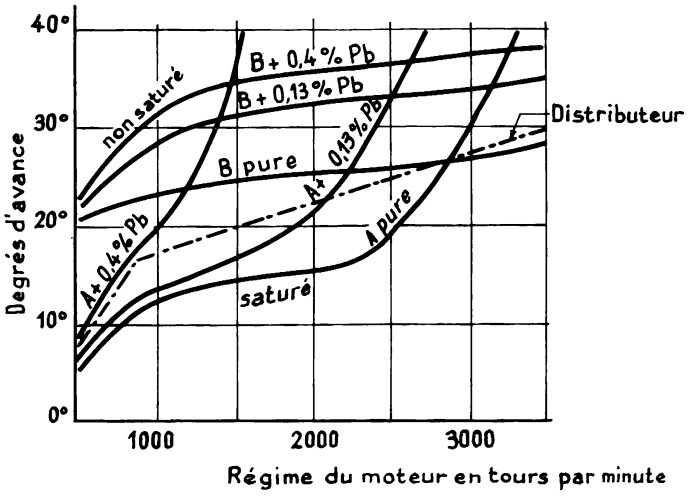
5. Le cracking catalytique peut donner des produits extrêmement variés tant comme qualité que comme répartition; ceci en jouant sur les trois facteurs : nature de la charge, catalyseur et température.

6. Le platforming donne des essences à hauts indices d'octane dans les parties lourdes très aromatiques. L'association d'une coupe légère de cracking catalytique et d'une coupe lourde de platforming est susceptible de donner des essences à indices élevés et de bons indices route.

Action du plomb sur la valeur antidétonante route des carburants. - Le plomb est un des principaux moyens dont disposent les raffineurs pour améliorer les qualités antidétonantes des carburants, et on

peut se demander si les résultats sur route suivent bien les résultats sur le moteur CFR et si 2 ou 3 points d'octane gagnés sur le CFR correspondent vraiment à un gain sur la route.

La méthode d'essais par courbes frontières permet une étude de l'action du plomb. La figure ci-dessous est relative, d'une part à une essence "A" du type saturé, ayant une "sensibilité" très faible ou nulle et une très bonne susceptibilité et, d'autre part, à une essence "B" fortement craquée, du type non saturé, d'une sensibilité excellente et très peu susceptible au plomb. Ces deux essences ont sensiblement des indices Motor method assez voisins.




Action du plomb sur la valeur route

Il résulte de l'examen de la figure que :

1. Ajouté à une essence très peu sensible, le plomb agit surtout dans les hauts régimes, ce qui n'est pas tellement intéressant pour les moteurs.

2. L'action du plomb sera d'autant plus efficace dans les bas régimes que l'essence sera plus sensible, et ceci malgré une mauvaise susceptibilité sur le CFR.

Le rapprochement des courbes de la figure et du tableau ci-après donnant les indices Motor et Research des essences "A" et "B" en fonction du plomb, est extrêmement intéressant :

| Proportion de plomb ‰ | Essence "A" Type saturé | | | Essence "B" Type non saturé | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Motor method | Research method | Sensibilité | Motor method | Research method | Sensibilité |
| 0 | 80 | 80,5 | + 0,5 | 82 | 94,5 | + 12,5 |
| 0,13 | 85 | 86 | + 1 | 82,5 | 96,5 | + 14 |
| 0,4 | 89,5 | 90,5 | + 1 | 84 | 98 | + 14 |
| 0,8 | 93,5 | 93 | - 0,5 | 85 | 99 | + 14 |

C'est ainsi que le carburant "A", pour ne pas cliqueter à aucun régime, a besoin de 0,4 ‰ de plomb, l'indice d'octane MM étant alors de 89,5, alors que le carburant "B", très sensible, ne nécessite que 0,05 ‰ de plomb, soit un indice MM de 82.

Cet exemple fait ressortir particulièrement l'action du plomb et le défaut de la Motor method.

On peut conclure que les indices d'octane gagnés avec le plomb par la Motor method correspondent à un gain effectif sur la route, d'autant plus grand que l'essence est plus "sensible".

Recherches sur la détermination des indices route à partir d'essais de laboratoires

Actuellement, nous disposons en fait de deux méthodes de laboratoires : la Motor method et la Research method; et de deux méthodes d'essais sur route : celle dite "Uniontown" dont le principe est la comparaison à l'oreille du maximum de détonation du carburant essayé avec celui d'un étalon à pleine admission et ceci indépendamment de la vitesse, et celle dite des "courbes frontières" que nous avons exposée précédemment et qui tient compte de la vitesse.

De ces quatre méthodes, les trois premières caractérisent la valeur du carburant par un chiffre, la dernière par une courbe ce qui, il faut bien l'avouer, est assez peu pratique. Aussi cette dernière méthode, si séduisante qu'elle puisse paraître, ne semble devoir être utilisable que pour les recherches sur moteurs et sur carburants, mais non pas pour les mesures de routine ou de contrôle des carburants seuls, ce problème étant, à vrai dire, le seul intéressant directement le raffineur.

Méthode Uniontown à 32 km/h. - Un perfectionnement à la méthode route Uniontown pourrait, semble-t-il, donner satisfaction en mesurant la détonation, non plus par son maximum, mais celle à un régime déterminé - relativement bas : 1 200 tours - puisque, en fait, c'est aux environs de ce régime que le client réagira au cliquetis de sa voiture.

La méthode consiste à accélérer, dans une voiture type (considérée comme représentative de la majeure partie des voitures de l'époque), à pleine ouverture, entre 20 et 50 km à l'heure, l'avance à l'allumage étant réglée de façon que le combustible donne la détonation standard à 32 km (20 milles) à l'heure. On encadre avec l'heptane et l'isooctane, la valeur octane route étant donnée par interpolation.

Les Américains ont essayé, par cette méthode, 375 carburants différents couvrant la gamme de 68 à 83 Motor et de 75 à 95 Research, la teneur en plomb variant de 0,8 $cm^3$ par litre.

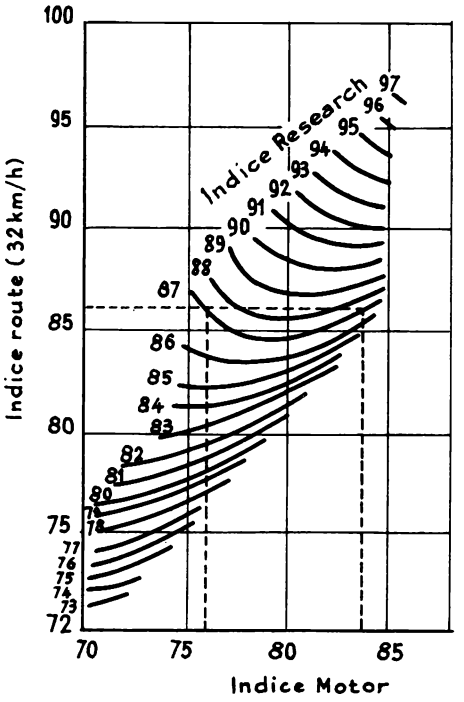
On disposait donc, pour chacun de ces carburants, de trois chiffres : indice Motor, indice Research, indice route Uniontown à 32 km. L'examen et la comparaison de ces trois chiffres pour chacun des 375 carburants essayés ont donné lieu aux observations suivantes :

a) Aucune relation valable ne peut être tirée entre l'indice Motor et l'indice route.

b) Il y a une plus grande relation entre l'indice Research et l'indice route. Les variations, dans ce cas, sont beaucoup plus réduites, l'erreur totale maxima étant de 5,8 points et l'erreur moyenne de ± 1 point d'indice route, ce qui, somme toute, est très acceptable.

c) Une étude détaillée de chaque essai indique, de plus, qu'on peut améliorer encore la relation entre l'indice route Uniontown (32 km) et la Research, en appliquant une correction fonction de l'indice Motor ou, ce qui revient au même, de la "sensibilité".

On arrive ainsi à la courbe ci-après qui donne une relation entre l'indice route, l'indice Motor et l'indice Research avec une erreur totale maxima de 4,5 points et une erreur moyenne de ± 0,9 point.




Relation indice route Motor, Research

Par exemple, un carburant 87 Research et 84 Motor donne un indice route de 86 qui est également la valeur donnée pour un 87 Research et un 76 Motor seulement.

En conclusion de cette méthode statistique et en considérant que la réaction du client au cliquetis se fait autour de 32 km/h :

a) Il existe une bonne relation entre l'indice route et la Research et l'on peut déduire la première de la seconde avec une erreur moyenne de ± 1 point.

b) Cette relation peut être améliorée par la connaissance supplémentaire de l'indice Motor, l'erreur moyenne est alors de ±0,9 point, l'erreur maxima étant réduite.

c) Pour le classement des carburants, l'indice route Uniontown, (32 km) en fonction des indices Research et Motor est d'une valeur indubitable.

d) Pour de nouveaux moteurs ou de nouveaux carburants qui nécessitent l'étude à tous les régimes et non à un régime conventionnel, la méthode des courbes frontières est fortement recommandée.

Remarque concernant l'amélioration de l'indice route Uniontown avec le plomb. - La comparaison de la courbe page 155 et du tableau suivant, nous permet un certain nombre de conclusions sur l'amélioration de l'indice route avec le plomb.

| Plomb ‰ | Essence "A" | | | | Essence "B" | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Type saturé | | | | Type non saturé | | | |
| | Motor | Research | Sensibilité | Valeur route Uniontown | Motor | Research | Sensibilité | Valeur route Uniontown |
| 0 | 80 | 80,5 | + 0,5 | 81 | 82 | 94,5 | + 12,5 | 94 |
| 0,13 | 85 | 86 | + 1 | 86 | 82,5 | 96,5 | + 14 | 98 |
| 0,4 | 89,5 | 90,5 | + 1 | | 84 | 98 | + 14 | |
| 0,8 | 93,5 | 93 | - 0,5 | | 85 | 99 | + 14 | |

a) On peut remarquer que l'addition de plomb à deux essences de sensibilité extrême ne fait pas ou peu varier cette sensibilité.

b) L'addition de 0,13 de plomb à une essence de sensibilité nulle augmente l'indice route dans les mêmes proportions que l'indice Motor, ce qui correspond à une amélioration réelle par le plomb.

c) Par contre, l'addition de la même quantité de plomb à l'essence "B" de bonne sensibilité améliore beaucoup plus l'indice route réel que ne l'indique la variation de l'indice Motor.

Toutes ces remarques sous la réserve qu'elles résultent d'essais américains.

Autres tentatives récentes de détermination de l'indice route à partir des résultats en laboratoire. - La méthode américaine de détermination de l'indice route Uniontown à 32 km/h que nous avons mentionnée ci-dessus est déjà ancienne, d'autres recherches ont été effectuées depuis dans différents pays qui tendent par des essais statistiques

à la détermination de formules empiriques donnant l'indice route, soit en fonction du $F_1$ et du $F_2$, soit même en fonction du $F_1$ et du $F_2$ et d'autres coefficients tenant compte de la composition du carburant par familles d'hydrocarbures : % d'oléfines, % de paraffine, % d'aromatiques, etc.

Nous donnons ci-dessous, à titre documentaire, quelques-unes de ces formules, mais on est en droit de se demander si tous ces efforts de recherches sont justifiés, étant donné, d'une part, le manque de définition précise de l'indice route et, d'autre part, sa variation considérable en fonction de paramètres qui ne dépendent que de la voiture, variations de l'ordre de la différence $F_1 - F_2$ et quelquefois même supérieure à cette différence.

Résultats américains (1957) sur voitures à taux de compression élevé :

Gamme de carburants { 86 à 104 Motor
97 à 105 Research

Ir (U.M.) = Indice route "méthode Uniontown modifiée"
Ir (F.M.) = Indice route "méthode frontières modifiée"

a) En fonction de $F_1$ et $F_2$ :

$$Ir\ (U.M.) = 11,51 + 0,64\ F_1 + 0,27\ F_2$$

$$Ir\ (F.M.)\ \text{grande vitesse} = 12,6 + 0,44\ F_1 + 0,47\ F_2$$

b) Effet de la teneur en oléfines :

$$Ir\ (F.M.) = 16,2 + 0,39\ F_1 + 0,48\ F_2 - 0,007\ (\%\ \text{d'oléfines})$$

pour les teneurs en oléfines de 6 à 40 %

c) Effet de l'octane Motor $F_2$ et de la composition :

$$Ir\ (U.M.) = 33,4 + 0,78\ F_2 - 0,08\ (\%\ \text{de saturés}) + 0,002\ (\%\ \text{d'aromatiques})$$

pour 27 à 66 % de saturés et 5 à 50 % d'aromatiques

$$Ir\ (F.M.) = 27,1 + 0,82\ F_2 - 0,06\ (\%\ \text{de saturés}) + 0,008\ (\%\ \text{d'aromatiques})$$

Résultats anglais par méthode dérivée de celle des courbes frontières modifiée :

$$Ir = 1,66\ F_1 - 0,52\ F_2 - 23,67$$

ou :

$$Ir = 1,12\ F_1 + 0,07\ (\%\ \text{d'aromatiques}) + 0,15\ (\%\ \text{d'oléfines}) - 21,58$$

Résultats allemands

$$Ir = 0,90\ F_1 - 0,24\ F_2 + 25,9$$

ou

$$Ir = 0,81\ F_1 + 0,5\ (\%\ \text{d'oléfines}) + 13,5$$

Résultats français : Ils semblent s'accorder avec la formule générale :

$$Ir = F_1 - a\ (F_1 - F_2)$$

a étant un coefficient compris entre 0,3 et 0 pour une gamme de carburants compris entre 90 et 100 Research.
a diminue quand le taux de compression de la voiture d'essai augmente c'est-à-dire que Ir est presque équivalent à $F_1$ et exceptionnellement un peu supérieur pour des taux voisins de 10.

L'indice route "méthode Uniontown modifiée" et la "sensibilité des essences". - On sait que la méthode Uniontown modifiée ne tient pas compte de la vitesse à laquelle le cliquetis se produit. Suivant que le moteur a tendance à cliqueter dans les hauts ou les bas régimes l'indice route ne se classe pas de la même façon par rapport aux $F_1$ et $F_2$. Pour les voitures qui cliquettent à bas régime, les indices route correspondent plus à la Research method.

Donc, à même indice Research, les voitures du premier type sont insensibles à la "sensibilité". Pour les voitures du second type, plus la "sensibilité" est faible, plus l'indice route est élevé.

Ceci est dû à ce que les carburants à grande sensibilité sont très affectés par les augmentations de température et de vitesse; ils sont donc pénalisés sur les voitures cliquetant à grande vitesse, comme ils le sont par définition par la Motor method.

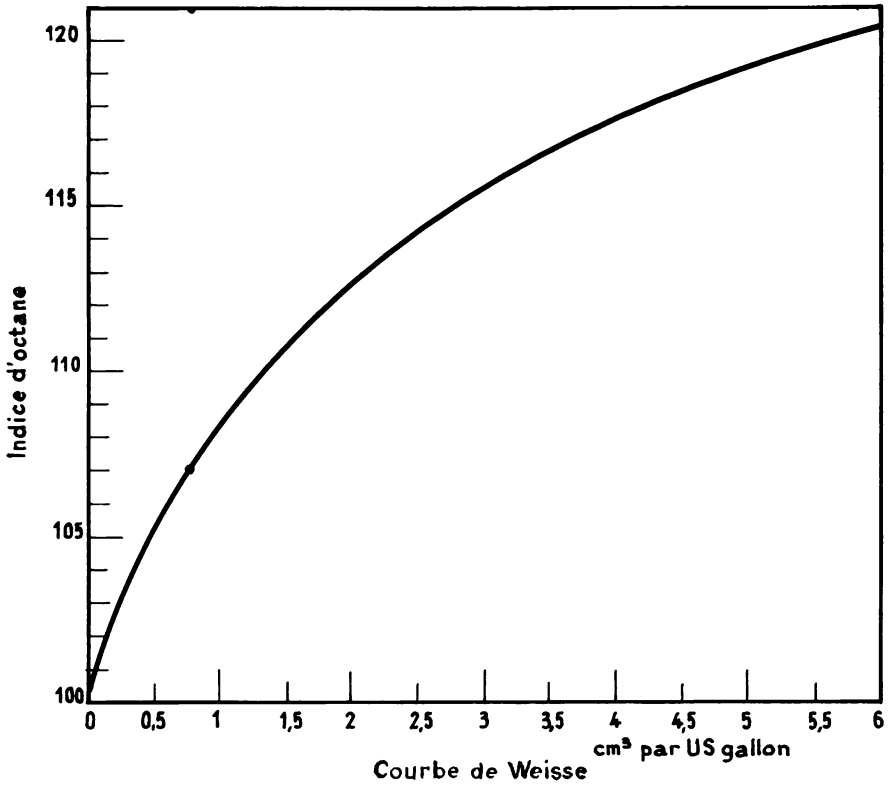
Mesure des indices d'octane au-dessus de 100 pour les carburants

On mesure ces indices par les méthodes normales Motor ou Research, mais en prenant comme carburants de référence isooctane + plomb comme pour les méthodes aviation. L'équivalent en plomb ayant été obtenu par interpolation, on se réfère à la courbe de Weisse pour obtenir l'indice d'octane.

Cette courbe a été obtenue en partant des indices de performance aviation, ceux-ci ayant été divisés par trois.

$$\text{Indice d'octane} = 100 + \frac{\text{Indice performance aviation} - 100}{3}$$

L'indice d'octane mesuré au-dessus de 100 est donc en réalité un indice de performance, et la courbe de Weisse reflète mieux en réalité la performance possible en fonction de la valeur antidétonante du carburant. Cette méthode reste toujours à l'état de "tentative".



Courbe de Weisse

## LES GOMMES

Quand on évapore de l'essence, dans un courant d'air ou sous pression d'oxygène, il reste dans l'appareil d'évaporation un résidu non volatil, qui se présente comme un produit vernissé. Ces dépôts, résidus d'oxydation, ont une composition chimique assez mal définie. On les désigne sous le nom de gommes.

### PROCESSUS DE FORMATION DES GOMMES

Les gommes apparurent lorsque de nouvelles fabrications conduisirent à livrer aux usagers non plus des essences de distillation pures, mais des essences ayant subi des traitements thermiques particuliers, soit pour leur élaboration (cracking), soit pour leur transformation (reforming).

Les gommes se forment aux dépens de certains hydrocarbures particuliers constituant les essences; elles ne se forment jamais à partir d'hydrocarbures saturés, mais apparaissent, au contraire, dans les non saturés. Ceux-ci n'ont d'ailleurs pas tous la même propension à former des gommes.

La présence d'oxygène est indispensable à la formation des gommes. L'oxydation se fait d'abord lentement, puis après une "période d'induction" plus ou moins prolongée, les réactions changent d'allure en s'accélérant. On peut admettre qu'il y a parallélisme entre la quantité d'oxygène absorbé et la quantité de gommes formées dans le carburant.

En plus des phénomènes d'oxydation, les molécules non saturées sur lesquelles s'est fixé l'oxygène donnent lieu à des polymérisations : plusieurs molécules se réunissent pour en former une nouvelle plus complexe.

En résumé, les gommes sont produites par la fixation d'oxygène sur des molécules d'hydrocarbures non saturés, s'unissant ensuite par polymérisation.

La composition chimique de ces gommes se rapproche beaucoup de celle des résines artificielles, genre bakélite.

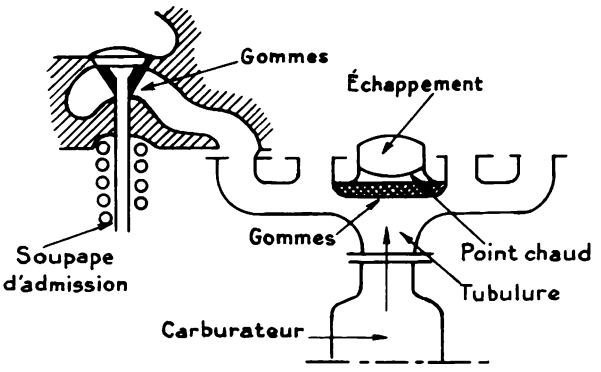
La formation des gommes peut être accélérée par l'action de facteurs tels que la lumière ou la chaleur. Inversement, l'apparition des gommes peut être retardée par la présence de corps susceptibles d'entraver les réactions et de s'opposer à la formation des peroxydes. Ces substances agissant comme anti-oxygènes ou "inhibiteurs" appartiennent généralement aux phénols ou aux amines.

## INFLUENCE DES GOMMES SUR LE FONCTIONNEMENT DU MOTEUR

La présence de gommes dans le carburant se traduit dans le moteur par des dépôts vernissés aux endroits de forte vaporisation du mélange carburé, c'est-à-dire aux endroits les plus chauds, soit au "point chaud" de la tubulure d'admission et sur la tige des soupapes d'admission.

### Point chaud de la tubulure d'admission (voir fig. p. 161)

Le rôle de celui-ci est précisément d'accélérer la vaporisation des gouttelettes liquides venant du carburateur. En ce point et avec




Les gommes dans le système d'admission

des carburants assez chargés en gommes, la quantité de dépôts peut être telle qu'elle diminue sensiblement la section de passage de la veine carburée et entraîne une diminution de puissance.

Nous avons vu, au démontage de certains moteurs, la section de passage réduite de 75 % par ces dépôts, qui se détachent par couches successives, stratifiées comme de l'ardoise.

En dehors de cet effet purement mécanique, les gommes constituent un revêtement calorifuge excellent et nuisent grandement au transport de chaleur entre gaz d'échappement et veine carburée, annihilant ainsi en partie l'efficacité du "point chaud".

## Soupape d'admission

La tige des soupapes d'admission constitue aussi un endroit chaud de forte vaporisation, où les gommes ont tendance à se déposer. Si le moteur reste à l'arrêt avec une soupape d'admission levée, il peut se produire une solidification au refroidissement de ces gommes, qui colle absolument cette soupape dans son guide; au démarrage suivant, le ressort peut ne pas réussir à la rappeler sur son siège, d'où impossibilité de départ et même risque d'incendie par retour au carburateur. Un moyen de se dépanner, dans ce cas, est d'injecter du benzol chaud dans les chapelles pour dissoudre les gommes et décoller les soupapes d'admission.

## Action des gommes de l'essence dans la chambre de combustion

Cette action est assez mal connue et il semble que les gommes brûlent pendant la combustion sans grand dommage pour les segments et les pistons. C'est ainsi qu'on a pu opérer normalement au banc pendant cent heures et davantage avec des essences contenant plus de 100 mg de gommes par litre, sans constater d'inconvénients majeurs au point de vue des soupapes et dépôts. Néanmoins, il semble que

ces gommes puissent accélérer les défauts dus au plomb tétraéthyle.

Il est aussi possible que les gommes de l'essence aient une action accélératrice sur la détérioration des huiles de graissage.

Aucun essai systématique ne permet, en tout cas, d'être formel sur les points ci-dessus.

Remarque. - On ne peut pas dire non plus que le "gommage" des segments ait une relation quelconque avec la quantité de gommes contenues dans l'essence. Ce "gommage" des segments est surtout fonction de la température, de la qualité de la combustion et surtout de la qualité de l'huile de graissage.

## TENEUR EN GOMMES DES CARBURANTS. GOMMES ACTUELLES ET POTENTIELLES

La quantité de dépôts est, en première approximation, proportionnelle au poids du résidu laissé par la simple évaporation du carburant, à la condition, toutefois, que l'essai d'évaporation précède de peu l'emploi; ce résidu est dénommé "gommes actuelles".

La teneur en gommes d'un carburant se mesure en milligrammes par 100 $cm^3$ de carburant. Elle est plus accentuée dans les essences de cracking, ce qui avait fait prohiber ces sortes d'essences pour l'aviation avant la guerre.

Sur les moteurs d'auto, les inconvénients signalés ci-dessus apparaissent dès que la teneur en gommes dépasse 10 mg par 100 $cm^3$ de carburant.

Il est à noter que la quantité de gommes que l'on décèle par une analyse est variable dans le temps, puisque ce sont des produits d'oxydation et que celle-ci se poursuit au stockage. Leur formation a même tendance à s'accélérer avec le temps; il y a donc lieu de prendre certaines précautions pour le stockage de certaines essences de cracking en mélangeant un produit destiné à arrêter l'oxydation ou simplement à la freiner. Ces produits sont appelés des inhibiteurs d'oxydation.

Les "gommes potentielles", qui mesurent en quelque sorte la stabilité à l'oxydation pendant le stockage, s'obtiennent par différence entre la teneur en gommes actuelles, après et avant une oxydation accélérée, dans un appareil de laboratoire, sous des conditions d'essai bien déterminées.

Remarque sur le benzol

Ce produit, qui constitue un excellent carburant, a néanmoins l'inconvénient d'être souvent chargé en gommes et d'être assez instable au stockage. Ceci tient à ce que ses conditions de "lavage" et de raffinage sont souvent assez rudimentaires. Il y a lieu de tenir compte de cette observation pour la composition et le stockage de carburants spéciaux benzolés (super ou course).

## NORMES LEGALES

La teneur limite en gommes est fixée par la Direction des carburants au maximum de 10 mg pour 100 $cm^3$ pour les carburants automobile. En pratique, dans les carburants distribués commercialement cette teneur dépasse rarement 2 ou 3 mg.

Pour l'aviation, la teneur maxima en gommes actuelles est fixée à 4 mg pour 100 $cm^3$; en gommes potentielles (après vieillissement) à 6 mg pour 100 $cm^3$.

### Les gommes dans les réservoirs des voitures

Les gommes, résidus d'évaporation, se déposent aussi dans les réservoirs des voitures. Leur quantité, après une ou deux années de service, peut devenir assez importante. Il est possible de se débarrasser de ces gommes ainsi que de tous les produits de corrosion en remplissant complètement le réservoir avec un "liquide de nettoyage" de composition suivante :

| | |
|---|---|
| Acide crésylique | 80 % V |
| Alcool méthylique | 15 % V |
| Solution d'acétate d'ammonium à 10 % d'eau | 5 % V |

## CORRELATION ENTRE LES GOMMES ASTM ET L'ENCRASSEMENT DE L'ADMISSION. AUTRES METHODES

La corrélation entre l'essai de gommes ASTM et l'encrassement du système d'admission du moteur est assez décevante. On peut tout juste admettre que lorsqu'un carburant est faible en gommes ASTM, il y a quelques chances pour que l'admission reste propre, c'est pourquoi on a cherché à établir d'autres essais plus représentatifs, notamment en changeant les conditions de l'essai ASTM.

Une méthode consiste à peser le résidu d'évaporation de 250 $cm^3$ de carburant (bain de vapeur à 100°C, jet d'air à température ordinaire) et à peser ce qui reste de ce résidu après lavage à l'heptane. C'est ce qu'on appelle les "gommes insolubles".

Il semble que la corrélation entre ces "insolubles" et l'état d'encrassement du système d'admission du moteur soit un peu amélioré par rapport aux gommes ASTM normales. Pour une essence normale l'insoluble ne devrait pas dépasser 0,5 à 0,8 mg pour 100 $cm^3$ de carburant.

## SOUFRE

Le soufre et les composés sulfurés existent sous diverses formes que le mode de traitement a plus ou moins éliminées ou transformées. A côté du soufre libre, les principaux produits sulfurés sont les mercaptans, les polysulfures et les thiophènes.

Le dosage du soufre se fait par combustion à la grille, à la lampe et dans des tubes.

Fort heureusement, les bruts du Moyen-Orient dont nous disposons en France, quoique riches en soufre dans les parties lourdes, sont relativement peu riches dans les coupes "essences".

Les proportions de soufre que l'on trouve sur le marché français varient dans d'assez larges limites, comprises entre 0,03 % jusqu'à 0,35 % selon le mode de traitement, ces dernières d'ailleurs assez rares.

Le meilleur traitement, à ce point de vue, est le reforming thermique, dont l'action désulfurisante est assez prononcée.

Le cracking catalytique, qui sera généralisé en France vers le début de 1954, se place déjà moins bien avec des teneurs probables de 0,15 à 0,2 %.

Le traitement par cracking thermique est le plus mauvais à l'égard du soufre des essences, les teneurs pouvant aller jusqu'à 0,35 %.

### Interaction du soufre et du plomb tétraéthyle dans les carburants

Un des principaux inconvénients du soufre est de diminuer la susceptibilité au plomb d'un carburant; cette diminution peut être notable et se chiffrer par 2 ou 3 points d'octane.

Cette interaction a été étudiée très sérieusement aux Etats-Unis et il semble que le gain en octane soit élevé, lorsque l'on peut éliminer d'une essence les dernières traces de soufre. Malheureusement, ces procédés ne sont pas économiquement viables à l'échelle industrielle.

### Action du soufre du carburant sur le moteur

On a pensé, par analogie avec ce qui se passe dans les combustibles pour moteurs Diesel, que le soufre des essences pouvait être rendu en partie responsable des usures des chemises des moteurs. Des essais sur une grande échelle ont été entrepris aux Etats-Unis en 1948 et 1949, dans des conditions d'exploitation diverses. Les résultats de ces essais sont assez peu concluants, mais il semble se dégager qu'en service "dur", le soufre n'ait qu'une influence négligeable sur l'usure, alors qu'en service "léger" son action est assez marquée.

## COULEUR

La couleur d'un produit s'examine par transparence par comparaison avec des verres étalons.

La couleur est une indication sans intérêt au point de vue du fonctionnement du moteur; elle a cependant une importance commerciale indiscutable.

Avec le développement des nouveaux procédés de raffinage, les raffineries ont dû écouler sur le marché des essences qui, par certaines cotes, sont nettement supérieures aux essences de première distillation courantes, mais qui ont l'inconvénient d'être parfois moins limpides, ou de se teinter après une certaine durée de stockage, ou une exposition à la lumière solaire.

La couleur peut être d'ailleurs facilement masquée ou modifiée par des colorants divers ajoutés à l'essence dans la proportion de 1 à 3 mg/l.

## ODEUR

L'odeur, pas plus que la couleur, n'a d'importance au point de vue du fonctionnement du moteur, néanmoins cette caractéristique a une importance commerciale indiscutable.

L'odeur peut être une indication sur la nature des hydrocarbures contenus dans l'essence, et aussi sur le mode de traitement et le raffinage plus ou moins bien fait.

La mesure de l'odeur dépend considérablement du facteur personnel de l'opérateur, qui note son impression après évaporation de quelques gouttes du produit sur une feuille de papier filtre, l'échelle de notation étant : mauvaise, médiocre, marchande, bonne marchande. La présence de mercaptans conduit à une odeur assez désagréable et marque un défaut de raffinage.

Une mauvaise odeur peut parfois incommoder les voyageurs d'une voiture qui viennent de faire le plein complet de leur réservoir, notamment dans les places arrière qui se trouvent souvent en dépression pendant la marche normale de la voiture.

Deuxième partie

# COMBUSTIBLES POUR TURBINES A GAZ D'AVIATION

## PROBLEMES PARTICULIERS A LA TURBINE A GAZ D'AVIATION

Le développement de la turbine à gaz pour l'aviation et les applications possibles sur moteurs terrestres a mis en évidence certains problèmes relatifs aux combustibles. L'utilisation de la turbine à gaz implique :

1. Un grand dégagement de chaleur sous un faible volume pour maintenir dans des limites raisonnables le poids et les dimensions des appareils de combustion.

Le taux de combustion est défini comme la puissance dégagée par unité de volume de la chambre et par unité de pression, soit :

$$t = \frac{\text{Puissance (en kW)}}{Vp}$$

Les taux de combustion sont de l'ordre de 40 000 à 70 000 $kW/m^3/hpz$ dans les turbines aviation, soit de dix à trente fois plus élevé que ceux des chambres de combustion pour turbines industrielles d'où l'utilité dans ces dernières d'avoir une forte turbulence entraînant inévitablement une perte de charge appréciable.

2. Un rendement de combustion aussi élevé que possible, la combustion devant rester stable dans des conditions de pression et de température très variables.

3. Une aptitude au pompage telle que le débit du combustible soit assuré aux températures les plus basses rencontrées en altitude.

4. Le démarrage doit être rapide et sûr au sol à la température la plus basse possible. A la suite d'une extinction en altitude, le réallumage doit être facile.

5. Le pouvoir calorifique doit être aussi élevé que possible pour obtenir un rayon d'action acceptable eu égard aux consommations élevées.

6. Les produits de la combustion ne doivent pas avoir d'effets néfastes sur les éléments du moteur, en particulier les tubes de flamme et les ailettes des turbines.

7. Le combustible doit avoir des caractéristiques assurant la sécurité de fonctionnement en évitant l'inflammation accidentelle.

8. Le combustible doit être disponible en quantité suffisante. Ce dernier point a une importance primordiale et explique l'évolution de ces dernières années des combustibles destinés à l'aviation militaire, grosse consommatrice en temps de guerre.

Les conditions énoncées ci-dessus amènent à des contradictions dans le choix des caractéristiques. Celles-ci résultent le plus souvent d'un compromis.

Nous examinerons maintenant chacune des caractéristiques principales des combustibles pour turbine aviation et leur influence sur le fonctionnement du moteur.

## DENSITE

C'est la caractéristique la plus simple à mesurer. Il est difficile de la considérer isolément puisqu'elle dépend à la fois de la coupe de distillation et de la composition chimique (nature du brut - mode de traitement). Elle est, en outre, en relation directe avec le pouvoir calorifique supérieur au kilo, tout au moins dans les limites pratiques des combustibles pour turbine, c'est-à-dire entre 0,750 et 0,850.

Cette relation est assez bien représentée par la relation empirique.

$$\text{Pouvoir calorifique supérieur : kg} = 12\,360 - 2\,100\,d^2$$

## INFLUENCE DE LA DENSITE SUR LE RAYON D'ACTION

On sait que la consommation des avions à turbine est encore relativement élevée par rapport à celle des moteurs à pistons; cette disproportion diminue rapidement dans le cas de vol à très grande vitesse et à altitude élevée.

Le rayon d'action peut être limité soit par le poids du combustible pour les avions de transport à fort tonnage, ce poids venant en déduction de la charge utile transportée, soit par le volume, c'est-à-dire la dimension des réservoirs, notamment pour les avions militaires de chasse à plus faible tonnage.

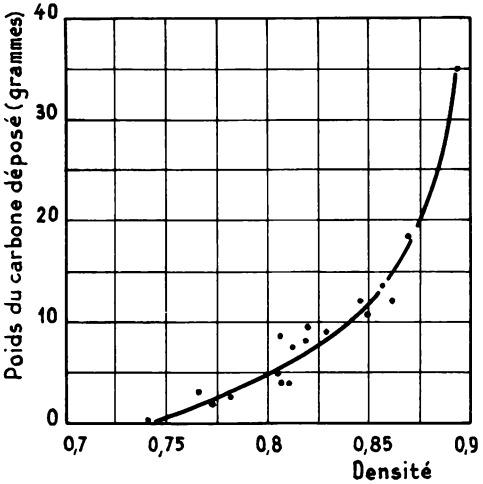
Dans le premier cas c'est le pouvoir calorifique au kilo qu'il importe de considérer et dont les différences extrêmes ne sont guère que de 3 à 4 %. Dans le second cas c'est le pouvoir calorifique au litre qui est important et dont les différences peuvent atteindre 10 % ce qui est loin d'être négligeable.

Dans la construction des avions modernes, il s'avère de plus en plus difficile de loger le combustible, c'est donc le pouvoir calorifique en volume qui est le plus intéressant et, par conséquent, les combustibles à densité élevée, à la condition toutefois que cette densité ne soit pas obtenue par adjonction de certains hydrocarbures ou par élévation du point final, dont l'effet serait d'amener une baisse de rendement de combustion.

## INFLUENCE DE LA DENSITE SUR LES DEPÔTS DE CARBONE DANS LES CHAMBRES DE COMBUSTION

Ces dépôts ont de nombreux inconvénients, ils sont évidemment fonction du dessin des chambres de combustion, mais aussi de la qualité du combustible. Ils sont favorisés comme dans les moteurs à pistons par un point final élevé et aussi par un rapport carbone/hydrogène élevé. Or, il se trouve que ces deux paramètres peuvent être reliés à la seule densité, tout au moins dans les combustibles usuels et, en fait, des essais effectués sur une gamme assez étendue de combustibles ont confirmé ce point de vue.

Il est à noter que les perfectionnements dans le dessin des chambres de combustion moderne ont apporté une nette amélioration dans le problème des dépôts de carbone, ce qui peut reculer la limite des combustibles utilisables.



Effet de la densité du combustible sur les dépôts de carbone

## INFLUENCE DE LA DENSITE SUR LE DEGRE D'ATOMISATION

Cette influence est faible et l'expérience a montré que ce n'était pas là un problème majeur.

## COURBE DE DISTILLATION

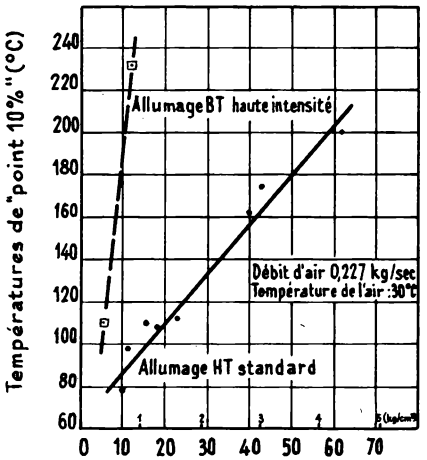
La coupe de distillation résulte d'un compromis entre des considérations techniques d'utilisation qui tendent à l'adoption des coupes étroites, et des considérations économiques et stratégiques de production qui tendent au contraire à les élargir.

L'élargissement de la coupe "kérosène" qui paraît être l'idéal peut s'obtenir soit du côté des légers, soit du côté des lourds, soit même simultanément.

### I. - INFLUENCE DES HYDROCARBURES LEGERS

#### a) Allumage au démarrage et réallumage en altitude

Avec les anciens systèmes d'allumage par bougie à haute tension, les allumages et réallumages sont grandement facilités par l'utilisation d'un combustible riche en légers. Cette facilité de démarrage est assez bien représentée par la pression minima du combustible nécessaire pour l'allumage.




Pression de combustible minima permettant l'allumage (P.S.I.)

Effet de la volatilité du combustible sur les caractéristiques de démarrage

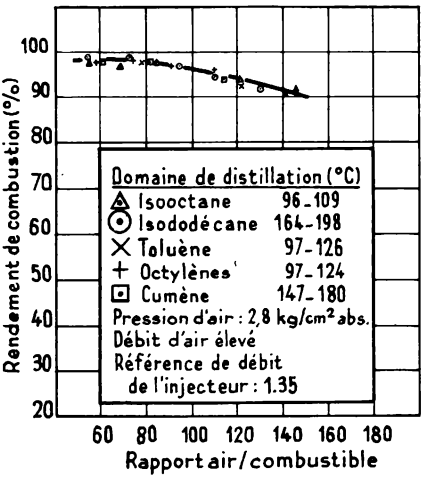
On voit par la figure ci-contre qu'elle varie linéairement en fonction du point de distillation 10 % qui représente assez bien la richesse en produits légers.

De toute façon on peut espérer que les perfectionnements de la construction, notamment dans la puissance des systèmes électriques d'allumage et aussi dans le sens d'une meilleure atomisation réduisent de plus en plus l'influence des légers dans ce domaine.

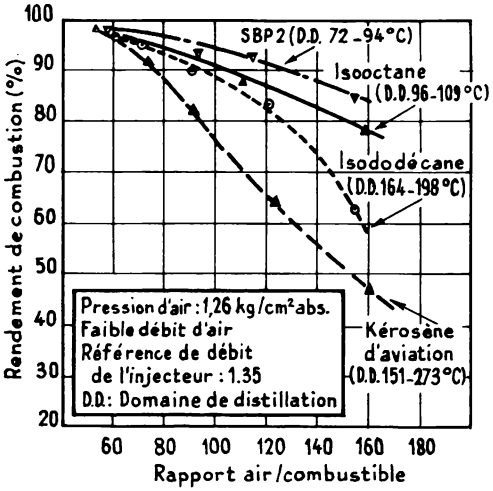
b) Rendement de combustion

Si pour les débits d'air élevés de fonctionnement à pleine puissance le rendement de combustion n'est que peu affecté par la volatilité du combustible, il n'en est pas de même dans les faibles régimes à débit d'air réduit; dans ce cas une réduction de débit de combustible peut faire baisser considérablement le rendement de combustion des combustibles à faible volatilité.

En fait, les hydrocarbures légers permettent de conserver un bon rendement de combustion dans les charges réduites; ce fait est illustré par les figures ci-dessous, où l'on voit que le rendement de




Comparaison de combustibles de catégories et de volatilités différentes




Comparaison de combustibles paraffiniques de volatilités différentes

combustion dans le cas de fonctionnement à bas régime (rapport air/combustible de 120) peut tomber de 92 à 65 % par l'utilisation d'un kérosène 150-175 à la place d'un isooctane commercial (96-109).

Cette perte de rendement de combustion est due principalement aux imbrûlés. De grands progrès ont été obtenus ces temps derniers qui ont permis de réduire cet inconvénient, notamment par de nouveaux injecteurs assurant une bonne pulvérisation aux faibles débits.

c) Stabilité de la flamme

La plage normale de fonctionnement stable s'étend entre deux limites pauvre et riche du rapport air/carburant 55/1 et 120/1, mais,

dans les conditions d'accélération et de décélération, la limite riche peut tomber à 20/1 et la limite pauvre atteindre 600/1.

Il y a donc danger d'extinction de la flamme, particulièrement à haute altitude.

Une mauvaise atomisation accidentelle peut parfaitement resserrer les limites de stabilité. La richesse du combustible en produits légers a pour effet d'offrir une marge de sécurité plus étendue.

d) Tampon de vapeur et désamorçage des pompes en altitude

Nous connaissons les inconvénients d'une volatilité trop élevée sur les moteurs à pistons qui entraînent des désamorçages et des pertes par évaporation. Ces difficultés s'accroissent considérablement avec les moteurs à turbine en raison des altitudes plus fortes et des grandes vitesses ascensionnelles qui laissent moins de temps au combustible pour se refroidir.

Le désamorçage des pompes, consécutif à une vaporisation brutale dépend non seulement de la volatilité du combustible, mais aussi de l'air dissous dans celui-ci qui, dans une montée rapide, peut rester en sursaturation, état essentiellement instable qui peut être rompu par une cause quelconque (par exemple la mise en route d'une pompe) provoquant alors un brusque dégagement d'air.

Il est à noter que la quantité d'air dissous dans un combustible lourd peut être aussi importante que dans un combustible léger et il est nécessaire, de toute façon, que le circuit d'alimentation soit prévu pour supporter une quantité importante de vapeur ou d'air en circulation et ceci d'autant plus que le combustible est riche en légers.

e) Pertes par évaporation en altitude

Ce problème est spécialement important puisque, outre le gaspillage de combustible, la perte par évaporation se traduit par une diminution du rayon d'action, cette diminution pouvant être notable.

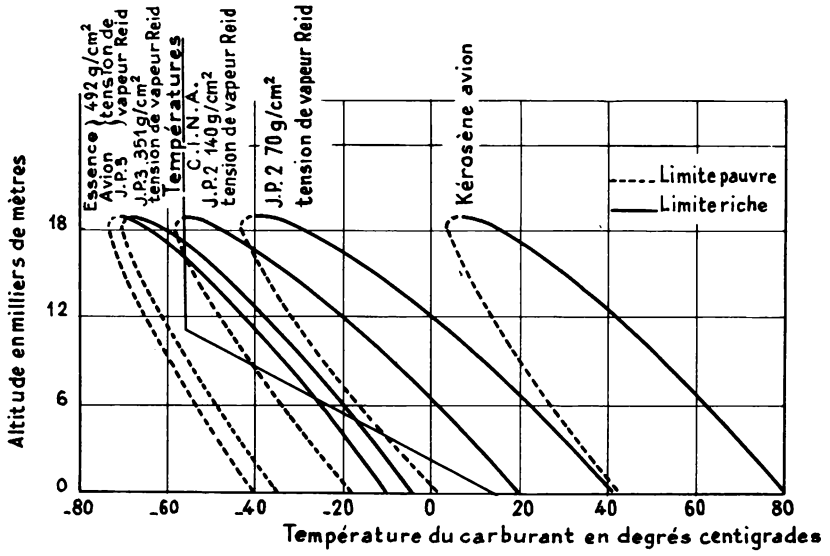
Cette perte est fonction de la tension de vapeur et de la richesse en légers, de la température initiale du combustible au départ de l'appareil et enfin de l'altitude.

A titre d'exemple, un combustible à 500 g Reid de tension de vapeur à une température de 30° C au départ est susceptible d'une perte minima de 7 % à 12000 m d'altitude, pour une température de 43° C au départ cette perte sera de 12 %.

Ces pourcentages de pertes représentent des minima, elles sont souvent dépassées en raison de ce que les vapeurs qui se dégagent peuvent entraîner du combustible à l'état liquide. Ces pertes peuvent être diminuées et même complètement supprimées par l'emploi de certains dispositifs et notamment l'utilisation de réservoir pressurisé.

f) Risques d'incendie

On a souvent répété que l'utilisation d'un combustible riche en légers augmentait les risques d'incendie. Cette opinion résultait souvent d'une mauvaise interprétation des courbes donnant les limites d'inflammation en fonction de la température et de l'altitude, les données qu'elles fournissent sont uniquement applicables aux conditions de repos, d'équilibre avec une source d'allumage à faible énergie.




Limites des risques d'explosion (équilibre de vaporisation)

On ne doit utiliser ces courbes que si ces conditions sont respectées. C'est ainsi, par exemple, que quand le combustible est pulvérisé à l'état d'aérosol et quand l'énergie d'allumage est suffisamment élevée, il n'existe pratiquement pas de limite pauvre.

Le combustible sous sa forme liquide n'est pas inflammable. Il peut se vaporiser si la température s'élève ou si la pression diminue.

Il peut aussi être pulvérisé par un ajutage ou quand on lui communique par choc une énergie suffisante pour former un brouillard type aérosol qui, comme la vapeur, peut s'enflammer aisément après mélange avec une quantité d'air appropriée. Les essais d'écrasement au sol du N.A.C.A. ont parfaitement établi ce point et démontré qu'une faible volatilité ne garantit absolument pas contre l'incendie.

Un autre facteur à considérer est la température d'allumage spontané qui, pour le kérosène et le gas-oil est un peu plus basse que celle de l'essence.

Un autre élément en liaison avec les incendies consécutifs aux écrasements est la vitesse de propagation de la flamme qui n'est aux températures normales au sol que de 0, 15 m/s pour le kérosène alors qu'elles dépassent 3, 85 m avec le JP 4 ou l'essence.

En se référant non seulement aux renseignements provenant de recherches aéronautiques, mais aussi à la somme d'expérience accumulée dans l'utilisation de l'ensemble des produits pétroliers, nous pouvons seulement conclure que l'adoption de combustibles peut volatils limite plus d'incendies qu'il ne serait possible de le faire avec un combustible léger à forte tension de vapeur.

Des études sont actuellement en cours pour la protection plus efficace contre les dangers de la foudre, notamment par introduction d'un gaz inerte dans les réservoirs ou par adoption de systèmes anti-explosifs.

### g) Répartition des températures dans le tube de flamme - Surchauffe des aubages

Un autre inconvénient des combustibles trop riches en légers est l'influence défavorable qu'elle a sur la répartition des températures à la sortie de la chambre de combustion. La longueur totale d'un tube de flamme est d'environ 60 cm et sur cette longueur un brassage suffisant de l'air de refroidissement avec les gaz chauds doit se produire pour qu'aucun noyau de gaz chauds vienne traverser les aubages.

La longueur de la flamme et sa forme sont influencées par la volatilité. Une évaporation plus rapide entraîne la formation d'un noyau central très chaud à la sortie de la chambre de combustion avec risque de surchauffe des aubages.

## II. - INFLUENCE DES HYDROCARBURES LOURDS

### Pouvoir calorifique au litre

Nous avons déjà examiné ci-dessus l'influence favorable des hydrocarbures lourds sur le pouvoir calorifique au litre du combustible, entraînant une augmentation du rayon d'action de l'appareil pour le plein des réservoirs.

### Approvisionnement en combustible

On ne peut citer aucun chiffre précis, mais on peut cependant admettre que pour améliorer les possibilités d'approvisionnement il est nécessaire de s'orienter vers des combustibles à point final plus élevé.

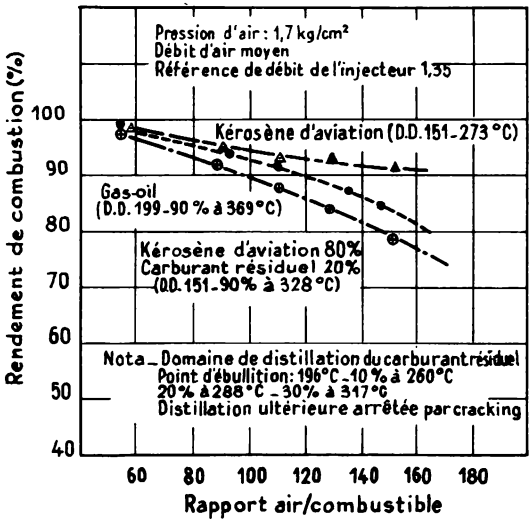
Les pétroles bruts mis à la disposition des raffineurs ont des caractéristiques très diverses, certains renferment un grand pourcentage d'essence et d'autres ne conviennent qu'à la fabrication de combustibles de soutes, ce fait affecte la quantité de carburéacteur qu'on pourra en tirer. La plus grande partie des carburéacteurs actuels sont obtenus par distillation directe, mais on peut envisager de modifier la composition moléculaire par des procédés du genre cracking catalytique ou encore séparer et concentrer un type d'hydrocarbures par extraction par solvants. Ces procédés augmentent inévitablement le prix du combustible.

### Formation de dépôts

L'augmentation du point final de distillation influe défavorablement sur les dépôts.

### Rendement de combustion

Nous avons déjà vu que les hydrocarbures lourds avaient une influence défavorable sur le rendement de combustion et ceci surtout dans les charges réduites.

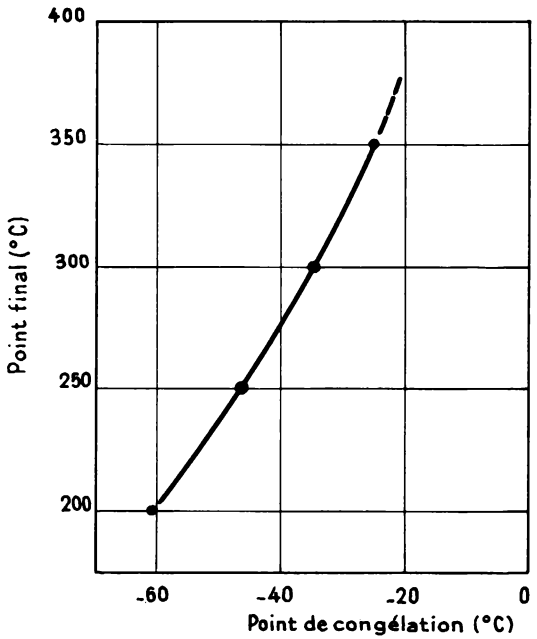


Effet de l'addition de fuel-oil "résiduel"

La figure, page 175, donne un exemple de l'influence défavorable de l'addition d'un fuel résiduel sur le rendement de combustion.

## Point final et congélation

Une élévation du point final de distillation entraîne la formation d'hydrocarbures de plus grande masse moléculaire dont le point de congélation est plus élevé. Il existe pour chaque brut une relation générale entre le point final et le point de congélation qui est indiqué sur la figure ci-dessous.




Effet de la relation du point final et du point de congélation d'un combustible

Une telle relation constitue l'un des inconvénients les plus sérieux inhérents à l'utilisation de combustible à point final élevé dans les turbines à gaz.

La caractéristique congélation elle-même sera étudiée plus loin.

## CONCLUSIONS SUR LA VOLATILITE

En conclusion de ce qui précède, nous pouvons résumer qu'une augmentation des légers influe favorablement sur :

- Les facilités de départ, allumage et réallumage en vol;
- Le rendement de combustion surtout dans les charges réduites;
- La stabilité de la flamme;
- Les possibilités d'approvisionnement;

Influe défavorablement sur :

- Le tampon de vapeur et le désamorçage des pompes en altitude;
- Les pertes par évaporation en altitude;
- Les risques d'incendie;
- Les risques de surchauffe des aubages de turbine.

Une augmentation des lourds ou du point final de distillation influe favorablement sur :

- Le pouvoir calorifique au litre, donc sur le rayon d'action;
- Les possibilités d'approvisionnement;

Influe défavorablement sur :

- La formation de dépôts;
- Le rendement de combustion;
- Le point de congélation et en général sur le fonctionnement à basse température.

Volatilité des combustibles actuellement utilisés

| | Point initial | Point final |
|---|---|---|
| Kérosène | 165 | 240 |
| JP 4 | 55 | 235 |
| JP 5 | 180 | 260 |
| JP 6 | 150 | 250 |

## TENSION DE VAPEUR

Cette caractéristique est un facteur de la volatilité que nous avons étudié précédemment, elle est liée à la richesse en produits légers.

L'ébullition du carburant a lieu quand la tension de vapeur est égale à la pression atmosphérique.

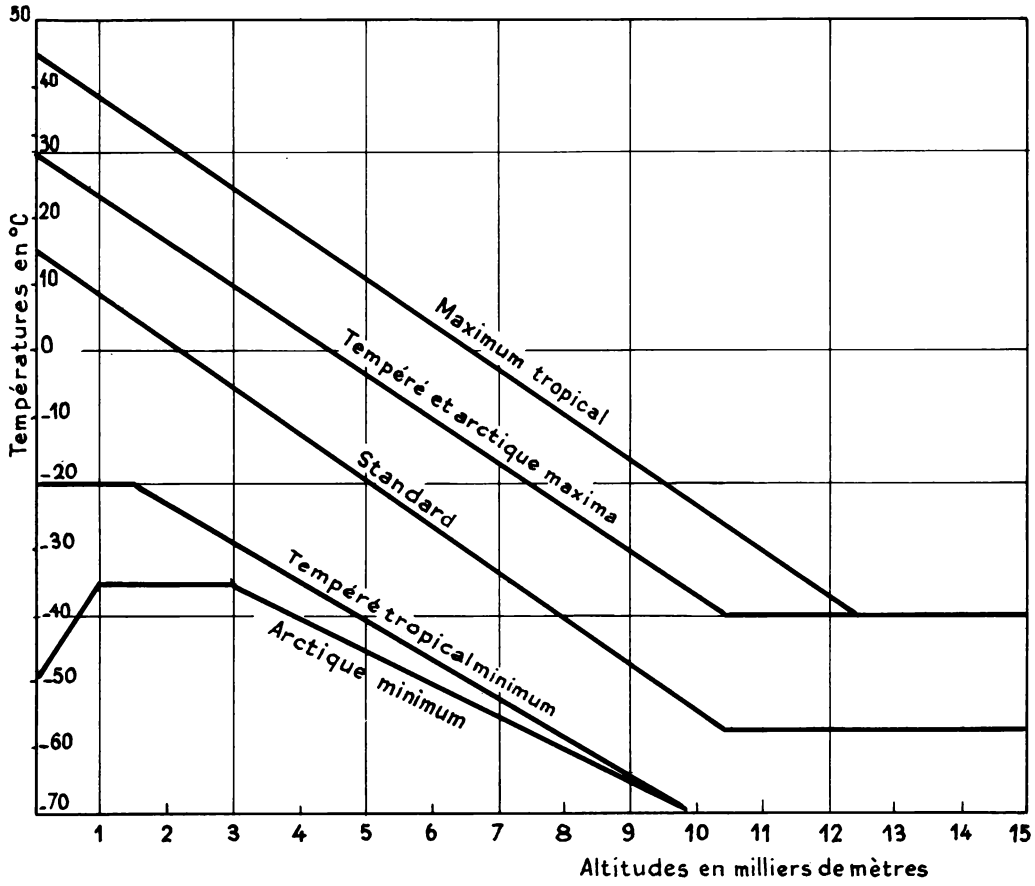
Les pertes du combustible par évaporation et diffusion de la vapeur sont négligeables tant que le combustible n'est pas à l'altitude d'ébullition.

La tension de vapeur du carburant est donnée par l'équation :

$$\log P = A - \frac{B}{T}$$

Dans laquelle :

P est la tension de vapeur;
T la température absolue du carburant;
A et B des constantes.



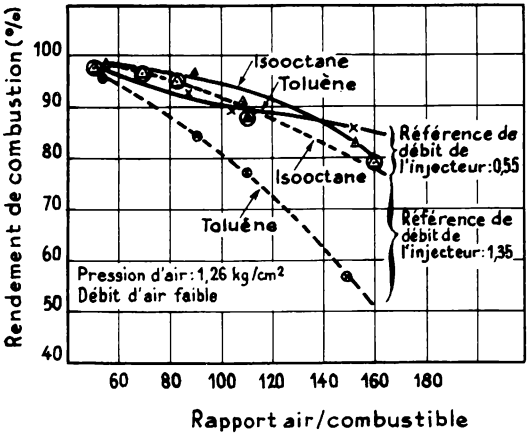

Conditions atmosphériques en altitude

## COMPOSITION CHIMIQUE DES COMBUSTIBLES

La composition des hydrocarbures est un facteur très important dans la détermination des caractéristiques antidétonantes des essences et des performances d'allumage des combustibles Diesel. Il ne semble pas qu'il en soit ainsi pour les carburéacteurs. Il y a eu cependant des cas où, par exemple, un combustible à haute teneur en aromatiques a donné un rendement de combustion inférieur de près de 10 % à celui

que donnait un combustible paraffinique de même volatilité. Des essais ont montré cependant que, dans des conditions identiques, avec une bonne atomisation et une bonne vaporisation, et à condition que le brassage soit satisfaisant, de telles différences ne sont jamais constatées, même lorsque la comparaison est effectuée entre le toluène et l'isooctane.

En revanche, avec une mauvaise atomisation (référence de débit de l'injecteur : 1, 35), des différences importantes peuvent être constatées. Il apparaît donc qu'avec une chambre de combustion bien étudiée et une atomisation correcte, aucune amélioration du rendement de combustion ne peut être obtenue par l'utilisation d'un combustible à faible teneur en aromatiques.




**Comparaison d'un combustible aromatique et d'un combustible paraffinique de volatilités semblables.**

L'influence de la composition des hydrocarbures sur le pouvoir calorifique et sur la formation de dépôts de carbone a déjà été examinée. On a limité la teneur en aromatiques en raison de l'influence de ceux-ci sur la formation de carbone et sur le gonflement du caoutchouc. Tant qu'on utilise des produits obtenus par distillation directe, une limitation de la teneur en aromatiques d'environ 25 % ne semble pas devoir être restrictive du point de vue de la facilité d'approvisionnement. Si en revanche on utilise des produits de cracking, la teneur en aromatiques de la fraction qui distille entre 150 et 220° C risque d'atteindre 70 % et dans ce cas une limitation de la teneur en aromatiques aurait une incidence très défavorable sur l'approvisionnement. Il faut également tenir compte, dans le cas des produits de cracking, de l'influence de la teneur en oléfines sur la stabilité pendant le stockage.

## CONGELATION DU COMBUSTIBLE

La température du combustible peut tomber en vol à - 50° C et quelquefois même un peu en dessous.

La spécification 2 482, suivant laquelle pratiquement tous les combustibles destinés aux moteurs à réaction civile, stipule un maximum

de - 40° C seulement. Malgré cet écart le gel du combustible ne soulève pas de problème pour les raisons suivantes :

a) Le - 40° C est une limite supérieure et, en fait, les points de congélation des combustibles commerciaux sont toujours inférieurs à - 40° C.

b) Le point de congélation est la température à laquelle la précipitation commence, mais, en fait, à cette température le combustible reste très fluide jusqu'à des températures nettement plus basses.

## PROCESSUS DE CONGELATION

Si l'on refroidit progressivement un combustible de distillation directe, on constate aux environs de 0° C un premier phénomène dû à la congélation de l'eau dissoute ou en suspension sous forme de fins cristaux de glace. Cette glace peut provoquer l'obstruction des filtres et quoiqu'on puisse pallier cet inconvénient par des dopes de dégivrage, le montage sur avion de dispositif de réchauffage avant filtrage se généralise de plus en plus.

Si l'on continue à refroidir, le combustible atteint le point de congélation (terme impropre puisque chacun des nombreux hydrocarbures compose le combustible à son point de congélation particulier). La congélation est en fait progressive et on admet que le point de congélation est la température de début de précipitation décelée visuellement, quoique, en fait, le combustible reste très fluide.

On différencie le "point de congélation" du point de trouble en ce que, dans le premier cas, l'essai est effectué avec agitation alors que dans le second il reste à l'état statique, en tout état de cause les températures obtenues sont très voisines.

On utilise plus précisément dans les spécifications le "point de congélation" parce que c'est lui qui détermine la tendance du combustible à provoquer l'obstruction des filtres par la paraffine. En fait, ce dernier problème ne se pose plus puisque, comme nous l'avons dit plus haut, on généralise maintenant les systèmes de réchauffage du combustible au-dessus de 0° C avant filtrage pour éviter l'obstruction des filtres par l'eau dissoute ou en suspension.

Le point de congélation représente donc assez mal la limite de température à laquelle le combustible peut être pompé hors d'un réservoir d'avion.

La limite de pompabilité peut se définir par la température jusqu'à laquelle on peut récupérer par pompage 97 % du volume du combustible contenu dans un réservoir sans entrée d'air.

Cette limite de pompabilité est nettement inférieure au point de congélation, mais malheureusement la différence n'est pas constante et on préfère se référer au "point d'écoulement" un peu supérieur à la limite de pompabilité, ce qui donne une indication suffisante de celle-ci.

Le point d'écoulement consiste à refroidir progressivement dans un récipient, à chaque abaissement de 3° on incline le récipient pour juger de la mobilité du combustible.

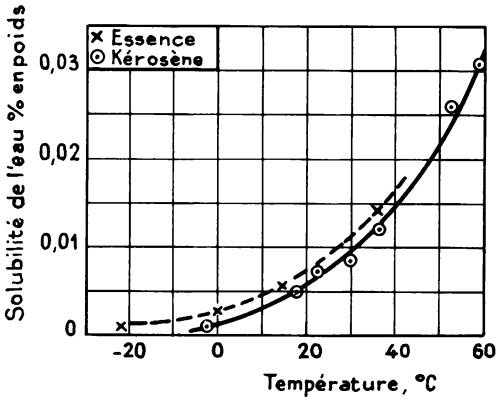
De toute manière tous les combustibles restent pompables au point d'écoulement, celui-ci donne donc une sécurité suffisante.

| Combustibles | Point de congélation | Point d'écoulement | Limite de pompabilité |
|---|---|---|---|
| 1 | - 46 | - 49 | - 56 |
| 2 | - 42 | - 46 | - 50 |
| 3 | - 35 | - 40 | - 41 |
| 4 | - 45 | - 46 | - 50 |
| 5 | - 43 | - 57 | - 59 |
| 6 | - 43 | - 49 | - 51 |
| 7 | + 1 | - 1 | - 3 |
| 8 | - 41 | - 43 | - 48 |
| 9 | - 45 | - 49 | - 51 |

Il est à noter que quand le combustible subit même une légère agitation dans le réservoir il reste pompable à des températures nettement inférieures à celles indiquées ci-dessus, des essais ont lieu actuellement pour maintenir cette agitation par recirculation du combustible au moyen de pompe, la sécurité au froid en sera encore augmentée notablement.

Séparation de l'eau et de la glace par abaissement de la température.

Le carburant délivré aux avions est exempt d'eau non dissoute. On l'obtient par de strictes procédures d'inspection et de drainage des réservoirs de stockage et des camions-citernes de ravitaillement. Cependant,dans une faible proportion, l'eau est soluble dans le carburant et ce dernier est normalement saturé d'eau à la température où s'effectue le ravitaillement des avions, en raison de la condensation atmosphérique et des procédés de manipulation. La quantité d'eau dissoute dans l'essence avion type et dans le kérosène est indiquée par les courbes de solubilité de la figure ci-dessous.




Saturation en eau de l'essence normale et du kérosène, à différentes températures.

Ces courbes montrent que la saturation en eau des carburants diminue très rapidement avec l'abaissement de la température. Le kérosène, par exemple, qui contient environ 0, 015 % d'eau en poids à la température de 40° C,n'en contient seulement que 0, 001 % à - 10° C. En conséquence, une partie de l'eau dissoute se sépare quand le carburant se refroidit dans les réservoirs de l'avion. Dans le cas d'un avion dont le plein des réservoirs est effectué en climat tropical à la température de 40° C, le refroidissement du carburant jusqu'à - 10° C, par suite de l'élévation en altitude, provoque la séparation de l'eau contenue en solution dans le rapport de 1, 2 litre d'eau pour 10 000 litres de carburant.

On a constaté expérimentalement que cette eau apparaît sous forme de fines gouttelettes au-dessus de 0° C et sous forme de minuscules cristaux de glace au-dessous de cette température. Ces cristaux ont pour la plupart une longueur de 1 ou 2 microns; pour des taux de refroidissement très lents, cette longueur n'est pas supérieure à 5 microns. La chute libre de particules si petites dans le carburant est si lente que leur dépôt au fond du réservoir ne risque pas de se produire, sauf après des périodes d'immobilité extrêmement longues.

Les cristaux de glace ont une tendance à colmater certains types de filtres. Les filtres à carburant pour moteurs, construits de façon à filtrer des particules de corps étrangers de l'ordre de 10 à 15 microns, laisseraient passer ces petits cristaux de glace. Mais on a trouvé que certains matériaux filtrants, notamment ceux du type feutré, ont la propriété de retenir les petites particules de glace.

## TENEUR EN SOUFRE

On peut envisager trois influences possibles du soufre :

1° L'attaque des éléments du circuit de combustible;
2° L'attaque des éléments de chambres de combustion et de turbine par les produits de la combustion du soufre;
3° L'influence des oxydes sulfureux et sulfuriques sur la quantité et la nature des dépôts de carbone.

La teneur totale en soufre ne donne aucune indication sur l'action corrosive d'un combustible vis-à-vis du cuivre ou de métaux similaires, ni de son action sur le caoutchouc. On a donc l'habitude d'inclure un essai de corrosion sur une éprouvette en cuivre qui est assez sensible au soufre corrosif du type mercaptan. Cet essai ne décèle cependant pas les acides libres minéraux comme l'acide sulfurique et pour cette raison l'acidité du combustible doit être spécifiée. Avec ces deux essais, on doit pouvoir éviter la corrosion des circuits de combustible et la détérioration du caoutchouc.

La combustion du soufre produit du $SO_2$ et du $SO_3$, ce dernier étant corrosif vis-à-vis particulièrement des alliages au nickel, qui sont utilisés largement dans les éléments de combustion des turbines à gaz. Cette action corrosive n'a pu cependant être mise en évidence qu'en milieu réducteur, c'est-à-dire avec un manque d'oxygène. Dans les zones secondaires et tertiaires d'une chambre de combustion, le milieu est nettement oxydant et des expériences ont confirmé que, dans ces conditions, aucune corrosion n'est à craindre de la part des composés sulfureux. Il n'a pas été possible non plus de mettre en évidence une influence quelconque de la teneur en soufre sur les dépôts de carbone, bien que l'expérience des moteurs Diesel, dans lesquels les carburants à haute teneur en soufre ont une action très marquée sur la quantité et la nature des dépôts de carbone, ait pu laisser croire, par analogie, qu'il en serait de même dans les turbines à gaz.

## COMBUSTIBLES UTILISES SUR LE MARCHE FRANÇAIS

On utilise actuellement sur le marché français trois sortes de combustibles :

1. Le "kérosène" TR 0 (ou turbo 1B) répondant à la norme "Air 3405" à coupe de distillation 165-240.

Ce kérosène est utilisé pour l'aviation commerciale et un peu par l'aviation militaire.

2. Le JP 4 ou TR 4 répondant à la norme "Air 3407", combustible dit à large coupe contenant plus de légers que le kérosène. Sa coupe de distillation est voisine de 55-235. Le JP 4 est le combustible normalement utilisé par l'aviation militaire.

3. Le JP 5 ou TR 5. Ce combustible, dit à "haut point d'éclair", est destiné à l'aviation embarquée pour limiter les risques d'inflammation à bord des porte-avions.

Le point d'éclair est normalement plus haut que celui du kérosène (minimum 60 au lieu de 40) et est destiné à être mélangé à de l'essence pour l'utilisation en vol.

4. On étudie enfin un combustible dit JP 6 pour aviation supersonique à grande stabilité thermique et devant résister aux échauffements dus aux grandes vitesses.

Ce JP 6 contient moins de légers et plus de lourds que le JP 4. Sur les avions, à nombre de Mach élevé, le carburant peut être porté relativement à une forte température, soit par échauffement cinétique des réservoirs, soit encore parce qu'on l'utilise comme agent de refroidissement (huile des turbines) avant de la brûler dans les chambres de combustion. Cette température avant injection peut atteindre 200° C. Dans ces conditions il se forme des gommes et des calamines entraînant un colmatage rapide des filtres. Le but recherché a donc été d'améliorer la stabilité thermique en éliminant le plus possible les traces de mercaptans.

Troisième partie

# LES HUILES COMBUSTIBLES POUR MOTEUR DIESEL

Nous nous proposons dans ce chapitre de faire le point des relations moteur-combustible en examinant la répercussion sur le fonctionnement du moteur Diesel d'une variation de chacune des caractéristiques principales du combustible.

Insistons d'abord sur le fait qu'il est difficile de considérer isolément chacune des caractéristiques du combustible, le changement de l'une d'entre elles interfère le plus souvent sur les autres et les effets sur le moteur se traduisent le plus souvent par des compromis.

Indiquons ensuite que les "petits moteurs" Diesel de traction et les "gros moteurs" fixes semblent se comporter différemment vis-à-vis du combustible, comme d'ailleurs des huiles de graissage, la frontière entre les "gros" à régime lent et les "petits" à régime rapide restant malgré tout assez "floue".

## CHOIX DU COMBUSTIBLE

Un moteur pourra généralement absorber un combustible d'autant plus lourd que son régime est plus faible et sa cylindrée plus élevée. Ceci n'est qu'une loi générale qui souffre quelques exceptions, car le choix du combustible dépend aussi de l'architecture du moteur (forme de culasse, système d'injection, refroidissement ou non des injecteurs, etc.) et nous connaissons certains moteurs de 4 000 ch qui, à 200 tours, ne peuvent absorber que du gas-oil, alors que d'autres de 200 ou 300 ch, à 600 tours, fonctionnent parfaitement avec des Diesel-oils et fuel-oils légers. Indiquons aussi que la suralimentation est un facteur favorable à l'absorption des fuels plus lourds, et enfin que l'utilisation des résidus lourds est parfaitement possible dans les gros moteurs et économiquement payante moyennant une adaptation convenable et quelques servitudes supplémentaires.

## LES COMBUSTIBLES DU MARCHE FRANÇAIS

Les combustibles dont nous disposons en France sont, en allant des plus légers aux plus lourds : le gas-oil, le fuel-oil domestique, le Diesel-oil, le fuel-oil léger, le fuel-oil n° 1, le fuel-oil n° 2.

Dans toute cette gamme de combustibles, seul le gas-oil est un produit de distillation, les deux derniers : fuel-oils n° 1 et n° 2 sont des résidus; enfin le fuel-oil domestique, le Diesel-oil et le fuel-oil léger sont des mélanges de gas-oil et de résidus en proportions croissantes de ces derniers.

Le fuel domestique est un combustible fiscal utilisé en remplacement de gas-oil pour le chauffage central dans les chaudières, pour les moteurs, tracteurs agricoles et engins de travaux publics, c'est le plus souvent un gas-oil moteur pouvant être mélangé à des distillats de cracking. Ce combustible ne paye pas la taxe routière. On y incorpore des "traceurs" : diphénylamine-furfurol pour déceler la fraude possible par utilisation routière, il est en outre coloré en rouge.

Tous les combustibles mentionnés ci-dessus sont disponibles sur le marché intérieur français à l'exçeption du Diesel-oil réservé au soutage des navires. Ce dernier est un mélange de 80 % de gas-oil et 20 % de résidus en France, alors qu'à l'étranger c'est le plus souvent un distillat lourd.

### Remarques sur les combustibles de mélange

Nous avons vu que le Diesel-oil et le fuel léger sont des mélanges d'un distillat gas-oil et de résidus (fuel n° 1 ou 2) en proportions telles que le produit final entre dans les caractéristiques administratives, les mélanges pour rester stables doivent être effectués en raffinerie sous le contrôle des laboratoires. On ne peut en effet mélanger n'importe quel gas-oil avec n'importe quels résidus sans risquer de graves mécomptes qui peuvent se traduire par des floculations et des sédimentations. Il y a des impératifs de solubilité et en général de compatibilité entre les produits issus de bruts différents. La pratique, qui consiste à mélanger directement dans les soutes d'un navire du gas-oil d'origine inconnue sous prétexte d'améliorer un produit plus lourd, est absolument condamnable et ne peut entraîner que des mécomptes.

Nous examinerons maintenant chacune des caractéristiques : densité, pouvoir calorifique, distillation, viscosité, indice de cétane, indice conradson, teneur en asphaltes, cendres, soufre, inflammabilité, couleur.

## DENSITE

La densité du combustible ne présente pas un gros intérêt, elle dépend pour une coupe de distillation déterminée du brut d'origine et du traitement en raffinerie. Elle peut néanmoins,pour les moteurs relativement rapides utilisant du gas-oil, avoir certaines répercussions sur la puissance ou la consommation du moteur. Un "cran" de réglage de la pompe à injection correspond à un certain volume de combustible injecté par cycle, et par conséquent au pouvoir calorifique au litre de celui-ci. La densité intervient donc ici par son action sur le pouvoir calorifique au litre et il peut y avoir intérêt, surtout quand on paye le combustible en volume, d'utiliser un combustible assez dense (en restant évidemment dans des limites raisonnables). C'est ainsi que l'on peut enregistrer à puissance équivalente des différences de consommation de 5 à 6 % entre un gas-oil de densité 0, 865 et un de 0, 820.

Les spécifications administratives prévoient pour le gas-oil une densité à 15° C, comprise entre 820 et 890; en fait,les caractéristiques commerciales se tiennent normalement entre 825 et 850.

Pour les produits plus lourds il n'y a pas de spécifications administratives pour la densité; les produits commerciaux sont normalement livrés entre les limites suivantes :

| | |
|---|---|
| Fuel-oil domestique ..... | 860-880 |
| Fuel-oil léger ..... | inférieur à 930 |
| Fuel-oil n° 1 ..... | inférieur à 960 |
| Fuel-oil n° 2 ..... | inférieur à 1 000 |

## POUVOIR CALORIFIQUE

Le pouvoir calorifique est le nombre de calories dégagé par la combustion de l'unité de poids du combustible.

Les pouvoirs calorifiques supérieurs (eau condensée) varient assez peu et se situent autour de :

10 800 calories pour le gas-oil;
10 700 à 10 650 calories pour le fuel-oil domestique;
10 650 à 10 600 calories pour le Diesel-oil;
10 600 à 10 500 calories pour le fuel-oil léger;
10 300 à 10 200 calories pour les fuel-oils n° 1 et n° 2.

Quelques techniciens emploient aussi le pouvoir calorifique inférieur qui diffère en moins du précédent de 700 à 600 cal/kg (700 pour les légers, 600 pour les lourds).

Les pouvoirs calorifiques en volume sont les précédents multipliés par la densité, ils sont intéressants à considérer quand on paye le combustible en volume.

Nous devons attirer l'attention des usagers sur l'inutilité d'imposer aux raffineurs dans des cahiers des charges très étudiés des pouvoirs calorifiques à 25 calories près, ceci pour deux raisons, la première est que les précisions de la mesure elle-même sont de $\pm$ 50 calories, la seconde étant que le raffineur, une fois la coupe de distillation, le mode de traitement et le brut traité déterminés, ne peut avoir aucune action sur le pouvoir calorifique du combustible.

La consommation du moteur pour une puissance déterminée est évidemment légèrement influencée par le pouvoir calorifique du combustible, mais le degré de transformation de ces calories disponible en énergie mécanique, c'est-à-dire la qualité de la combustion elle-même, a une influence beaucoup plus considérable sur la consommation.

## DISTILLATION

Les combustibles pétroliers étant des mélanges d'un très grand nombre d'hydrocarbures ayant chacun des points d'ébullition différents, la courbe de distillation nous renseigne sur les proportions relatives des différents constituants, la présence, en effet, dans un combustible d'une fraction importante d'éléments lourds peut influencer la qualité de la combustion et par conséquent avoir une répercussion sur l'encrassement et la consommation du moteur.

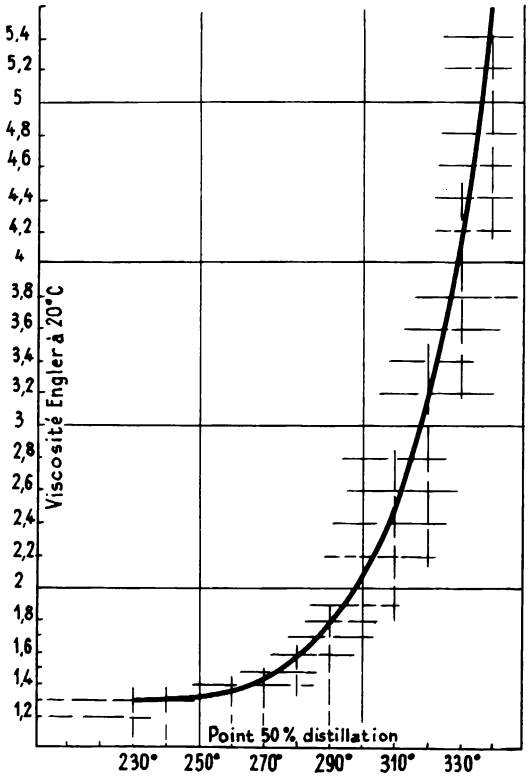
La courbe de distillation A.S.T.M. est une mesure de la volatilité des combustibles légers, comme le gas-oil, elle ne donne plus aucune indication pour les combustibles plus lourds, car, au-dessus d'une température voisine de 380° C, les hydrocarbures ne sont plus stables et "craquent". Ce "cracking" est une décomposition des éléments lourds qui libère une fraction de carbone provoquant des dépôts indésirables dans les moteurs.

Pour les fuels plus lourds, on pourrait penser qu'une distillation sous vide pour éviter la décomposition serait intéressante, mais ceci éloignerait beaucoup des conditions de marche du moteur, et le seul

critère de volatilité est l'essai de carbonisation ou "indice conradson". Cet essai de carbonisation à l'abri de l'air, dont nous parlerons plus loin, donne une bonne corrélation avec la quantité des dépôts que l'on peut trouver dans le moteur. La volatilité moyenne d'un combustible léger, comme le gas-oil, peut être approximativement représentée par la température de distillation 50 %. Ce point 50 % est d'ailleurs en relation assez étroite avec la viscosité, comme le montre la courbe de la figure ci-dessous.

La volatilité a aussi une certaine influence sur la partie physique du "délai d'inflammation" mesuré par l'indice de cétane. On peut être un peu moins exigeant sur l'indice de cétane d'un gas-oil si le point 50 % de distillation est plus bas.

On a remarqué en outre que la fumée à l'échappement à pleine ouverture au cran maximum de la pompe à combustible augmente généralement lorsque les points de distillation 50 % croissent.




Viscosité Engler à 20°C
en fonction du point de distillation 50%.

Les normes administratives et commerciales prévoient pour la distillation :

Gas-oil : distillé avant 255° C, un maximum de 50 %;

Gas-oil : distillé à 360° C, un minimum de 90 %;

Fuel-oil domestique : distillé avant 270° C, un maximum de 50 %;

Fuel-oil léger : distillé avant 270° C, un maximum de 50 %;

Fuel-oil n° 1 : distillé avant 270° C, un maximum de 50 %;

Fuel-oil n° 2 : distillé avant 270° C, un maximum de 50 %.

## VISCOSITE

La viscosité, qui caractérise la difficulté avec laquelle les molécules du combustible se déplacent les unes par rapport aux autres,

est une caractéristique très importante, quant à la qualité de la combustion, elle conditionne en grande partie la finesse de pulvérisation et l'énergie du jet sortant de l'injecteur, dont dépend la bonne répartition dans la chambre de combustion.

Pour une pression à l'injection donnée, un combustible peu visqueux se pulvérisera en gouttelettes très fines, ce qui est un facteur favorable à la bonne combustibilité, par contre la masse de ces gouttelettes étant faible, la pénétration sera faible et il est possible qu'une partie de l'air de la chambre ne soit mal utilisé; il y aura dans ce cas formation de fumée noire, caractéristique de manque d'oxygène; si au contraire on utilise un combustible trop visqueux, les gouttelettes seront plus grosses, elles pénétreront plus loin dans la chambre et il est même possible qu'elles toucheront la paroi opposée à l'injecteur relativement froide, le contact avec une paroi froide provoquera une rupture de la chaîne des réactions de combustion avec formation de fumée bleue et odeur piquante à l'échappement et formation d'aldéhydes et d'acides, produits intermédiaires de combustion.

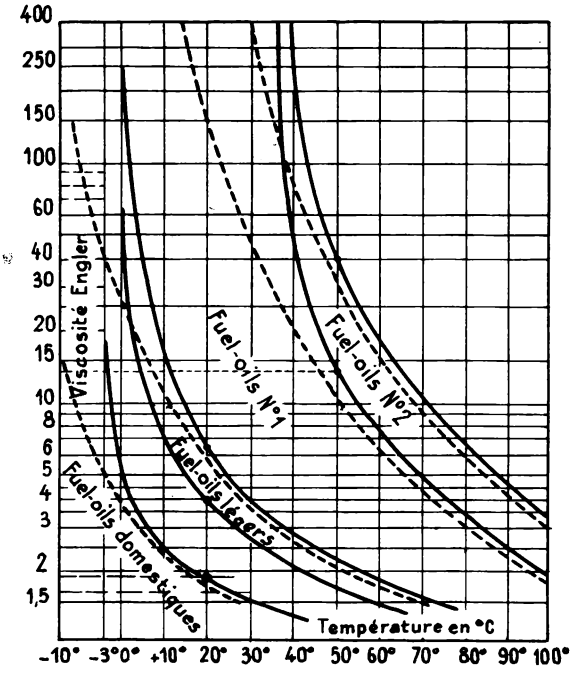
On voit, par les observations ci-dessus, qu'une fois la pression à l'injection déterminée ou réglée, pour avoir une qualité de combustion satisfaisante (qualité dont dépendent consommation et encrassement) les limites de viscosité admissibles pour le combustible sont assez étroites.

## VARIATIONS DE LA VISCOSITE EN FONCTION DE LA TEMPERATURE ET DE LA PRESSION.

La viscosité du combustible varie avec la température, selon les lois bien connues (voir figure ci-après), mais elle varie aussi avec la pression, selon les lois moins bien connues. La connaissance de ces lois est une nécessité. L'utilisation dans les moteurs de combustibles résiduels lourds ou le contrôle de la viscosité à la température et à la pression immédiatement en amont de l'injecteur est très important.

Il résulte d'études entreprises par Fiat que pour obtenir une bonne pulvérisation il est nécessaire que la viscosité du combustible immédiatement en amont des trous d'injecteur, doit être inférieure à 2° Engler et qu'en aucun cas elle ne doit dépasser 6° Engler; ceci suppose un réchauffage des combustibles lourds plus élevé qu'on a l'habitude de le faire, c'est ainsi qu'un fuel

résiduel du type fuel-oil n° 1 français, de 10 ° Engler à 50 ° C, a une viscosité sous 700 kg de pression de 45 ° Engler; pour porter ce combustible sous cette pression à 2 ° Engler, considérée comme correcte pour une bonne pulvérisation, il faut le réchauffer à 120 ° C, alors que 95 ° C eussent semblé suffisants en faisant abstraction de la pression.




Courbes de viscosité des fuel-oils du marché français 1958

| | Gas-oil | F.O.D. | Diesel-oil | F.O.L. | F.O. n° 1 | F.O. n° 2 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Caractéristiques administratives** | | | | | | |
| Viscosité : | | | | | | |
| à 20° Centistokes | Max 9 | inf. à 12 | | inf. à 53 | | |
| à 20° Engler | Max 1,74 | inf. à 2 | | inf. à 7 | | |
| à 50° Centistokes | | | | | Max 110 | 110 à 460 |
| à 50° Engler | | | | | Max 14 | 14 à 60 |
| **Caractéristiques commerciales** | | | | | | |
| Viscosité : | | | | | | |
| à 20° Centistokes | Max 9 | Max 9,5 | | 29,5 à 49 | | |
| à 20° Engler | Max 1,74 | Max 1,8 | Max 3 | 4 à 6,5 | | |
| à 50° Centistokes | | | | | Max 110 | 110 à 304 |
| à 50° Engler | | | | | Max 14 | 14 à 40 |

## INDICE DE CETANE

L'indice de cétane d'un combustible mesure sa plus ou moins bonne aptitude à s'enflammer; c'est en fait une mesure du "délai d'inflammation". Ce "délai",qui est un temps, peut être mesuré soit en milliseconde, soit en cétane par comparaison avec deux combustibles étalons le cétane pur (indice 100) et l'alphaméthylnaphtène (indice 0).

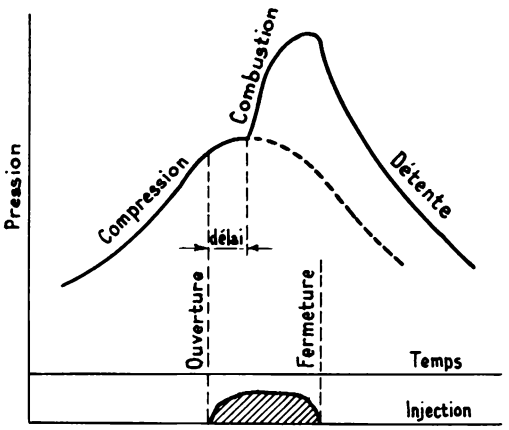


Diagramme pression-temps

Cette aptitude du combustible à s'enflammer dépend de la nature même du combustible et du mode de traitement en raffinerie. L'indice de cétane sera d'autant plus bas que les hydrocarbures du combustible seront stables thermiquement. C'est ainsi que les hydrocarbures aromatiques résistant au cracking seront beaucoup plus longs à enflammer que les paraffiniques à chaîne longue qui craquent facilement.

Cet indice de cétane étant en réalité une mesure de temps, on conçoit facilement qu'il prenne d'autant plus d'importance que le temps dont on dispose pour la combustion est plus court ou, ce qui revient au même, que le régime du moteur est plus rapide. C'est ainsi que si pour un moteur rapide à 1 500 tours il est nécessaire d'avoir un indice de cétane de 50, cet indice n'a plus qu'une importance réduite pour les moteurs de grosse cylindrée à régime lent, sauf toutefois en ce qui concerne l'aptitude au départ à froid, mais on dispose pour ces gros moteurs de moyens de démarrage puissants. Cette caractéristique n'est donc à considérer, en pratique,que pour les gas-oils et à la rigueur pour le fuel-oil domestique, à l'exclusion des autres fuels plus lourds.

## INFLUENCE DE L'INDICE DE CETANE SUR LE FONCTIONNEMENT DES MOTEURS

Le délai d'allumage, mesuré par l'indice de cétane, a une influence sur l'aptitude au départ à froid des moteurs, cette amélioration des départs à froid avec l'élévation de cétane est à peu près générale et surtout sensible aux basses températures. Elle est évidemment

bien moins importante pour les grosses cylindrées où les moyens de démarrage sont normalement plus puissants.

Sur les moteurs de petites cylindrées l'indice de cétane a une influence sur la dureté de marche et aussi sur la qualité de la combustion, encore cette influence étant nettement moins marquée sur les moteurs à préchambre que sur les moteurs à injection directe. Même dans ces derniers moteurs il n'est pas souhaitable d'utiliser un gas-oil à indice cétane trop élevé, car si le délai est trop court, le cognement étant complètement supprimé, une partie du combustible brûlera dès son introduction dans la chambre et gênera le reste dans sa recherche de l'air frais. Ce fait entraînera la formation de fumée et d'odeur, et on constatera une surchauffe de l'injecteur avec formation de trompettes de coke au nez de l'injecteur. L'apparition de ces trompettes de coke est extérieurement gênante en ce sens qu'elles modifient l'angle du jet entraînant une mauvaise répartition du combustible.

Dans le cas où les indices de cétane de certains combustibles sont très bas, il peut être intéressant d'utiliser certains dopes, comme le nitrate d'éthyl, le DB 36 de l'éthyl, pour ramener l'indice de cétane à une valeur convenable.

## DIESEL INDEX

Nous avons vu que le délai d'allumage mesuré par l'indice de cétane était fonction de l'aptitude au cracking du combustible, ou encore de sa stabilité thermique. Cet indice de cétane est mesuré sur un moteur Diesel expérimental CFR, mesure par conséquent assez longue et coûteuse, et qui ne reproduit pas fidèlement le délai dans un moteur quelconque. On a cherché par conséquent d'autres tests physico-chimiques permettant de se faire une idée des qualités d'allumage par des mesures de laboratoires en reliant l'indice de cétane à d'autres caractéristiques physiques ou chimiques du combustible. Beaucoup de méthodes ont été avancées, la moins mauvaise d'entre elles est certainement la détermination du "Diesel index" qui est fonction de la densité à 15° (plus exactement de la specific gravity) et du point d'aniline.

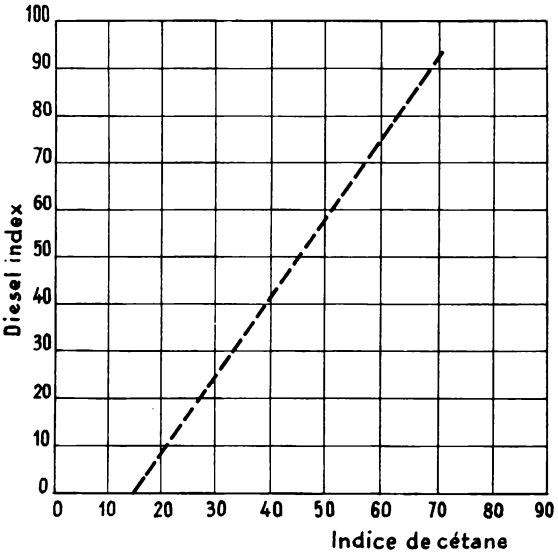
$$\text{Diesel index} = \frac{\text{specific gravity} \times \text{point d'aniline (en °F)}}{100}$$

la specific gravity étant très sensiblement notre densité à 15°C.

On peut traduire approximativement le Diesel index en indice de cétane en se servant de la courbe de la figure ci-après en tenant

compte de la zone de dispersion possible. Cette zone de dispersion se réduit pour des combustibles provenant du même brut et dans ce cas on peut considérer le Diesel index comme une mesure convenable. Quand il s'agit de faire des comparaisons entre des combustibles provenant de bruts différents, l'échelle des Diesel index doit être appliquée avec la plus grande circonspection. Cette mesure n'est absolument plus valable dans le cas de combustible dopé ou de combustible végétal; la seule ressource que l'on ait dans ce cas est de revenir aux essais sur moteur, c'est-à-dire à la mesure directe de l'indice de cétane.

D'autres chercheurs ont relié l'indice de cétane à la volatilité moyenne (point de distillation 50 %) et à la densité et ont obtenu des formules empiriques; les résultats obtenus ne peuvent donner qu'un ordre de grandeur et comme pour l'index Diesel, quand on recherche plus de précision, il y a obligation de revenir à la mesure directe sur moteur qui, lui-même, n'est reproductible qu'à $\pm$ 2 points de cétane.



Relation approximative cétane-Diesel index

Nous avons fait mention du Diesel index parce que les cotations de certains combustibles d'importation tiennent compte de cette caractéristique.

Les normes administratives prévoient un minimum de 50 cétane pour le gas-oil; pratiquement les gas-oils livrés sur le marché français sont tous compris entre 50 et 60 cétane, les Diesel index étant de 58 à 72.

Les quatre caractéristiques que nous examinerons maintenant sont : teneur en asphaltes, cendres, conradson et soufre. Elles se rapportent toutes aux questions d'usure et d'encrassement des moteurs sans influence sensible sur les questions de puissance et de consommation; elles sont intéressantes notamment dans les combustibles résiduels, car elles influent dans une large mesure sur l'économie d'exploitation des moteurs.

## MATIERES ASPHALTIQUES

Elles se composent, dans les résidus, d'asphaltènes, résines et carboïdes, ces derniers très stables thermiquement et brûlant lentement. Toutes ces matières sont dispersées dans le combustible à l'état colloïdal. On les distingue au point de vue chimique en :

### Asphaltènes durs

Hydrocarbures non saturés, à haut point de fusion, insolubles dans l'essence 60/80, mais solubles dans le benzène en quantité assez faible dans les fuels de distillation et plus importante dans les fuels de cracking, donnant lieu après combustion à des écailles dures et abrasives.

### Asphaltènes mous

Dont le point de fusion est inférieur à 100° C qui précipite dans une solution alcool-éther, donnant lieu après combustion à des résidus collants et mous.

On peut éliminer partiellement l'asphalte par épuration centrifuge en ayant soin de réchauffer avant centrifugation entre 80° et 90° C. Si on opère à température plus basse, le liquide reste trop visqueux et l'eau, les matières terreuses et les chlorures ne se séparent pas bien; si au contraire on réchauffe trop, les asphaltes mous deviennent fluides et ne séparent plus bien.

Les asphaltes des combustibles résiduels peuvent être la cause de ratés d'allumage, ils donnent toujours lieu à des dépôts sur les chemises et pistons, en outre, les produits résineux qu'ils contiennent ont la propriété de stabiliser les émulsions huile-eau en rendant plus difficile la séparation de ces dernières. Ce fait peut être extrêmement gênant dans le cas où pour une cause quelconque il y aurait introduction d'eau de mer dans le combustible.

Les normes administratives ne mentionnent pas de teneur en asphaltènes, commercialement les maxima sont de 1 % pour le fuel-oil domestique, de 3 % pour le fuel-oil léger et peuvent aller jusqu'à 5 et 10 % pour les fuels résiduels n° 1 et n° 2.

## CENDRES

Ce sont les impuretés minérales solides qui restent à la fin d'une combustion complète; elles se présentent sous forme de composés de Si, Fe, Ca, Na, Va, etc. Les teneurs en sodium et vanadium sont souvent importantes, le premier donne à la combustion du $SO_4Na_2$ dont le point de fusion est de 880° C, le second dont la teneur peut aller jusqu'à 50 % du total des cendres donne du pentoxyde de vanadium $V_2O_5$ dont le point de fusion est aux environs de 640° C. Ces deux composés sont très corrosifs à l'état liquide.

Les matières inorganiques en suspension ou dissoutes dans les gouttelettes d'eau, comme le chlorure de sodium,peuvent être éliminées en grande partie dans l'installation de purification.

L'introduction d'eau à raison de 1 ‰ du combustible dans l'épurateur centrifuge est souvent conseillée pour faciliter l'élimination des cendres solubles, néanmoins cette pratique peut conduire à la formation d'émulsions.

Tant que les cendres restent à l'état liquide, les risques de dépôts sont relativement faibles, mais si à l'état visqueux elles rencontrent des endroits froids elles s'y déposent; c'est ainsi qu'aux soupapes ou aux lumières d'échappement où la vitesse des gaz est élevée, le refroidissement provoque des dépôts. Le même phénomène se présente sur les aubes directrices et mobiles des turbines à gaz dont les températures sont de 4 à 500° C.

Un moteur de 1 000 ch brûlant un combustible à teneur moyenne en cendres de 0,15 % produit 6 kg de cendres en vingt-quatre heures. Ces 6 kg sont fort heureusement évacués en grande partie par l'échappement, mais il n'est pas moins vrai que ce qui reste en se mêlant à l'huile de graissage a une part de responsabilité dans l'usure des chemises et des segments. Une partie des cendres peut être éliminée par une centrifugation soignée suivie d'une clarification.

## REMARQUES SUR L'EPURATION DES COMBUSTIBLES POUR MOTEURS DIESEL

Les résultats obtenus avec un combustible dépendent souvent beaucoup plus de la "propreté" de celui-ci que d'une variation le plus souvent légère d'une caractéristique physique telle que densité, soufre, teneur en cendres, etc.; la qualité de la combustion, donc la

consommation, la bonne conservation des pompes et des injecteurs, les frais d'entretien, et enfin l'usure des chemises et segments, sont en relation étroite avec la "propreté" du combustible, d'où la nécessité d'une surveillance constante des épurateurs et clarificateurs centrifuges à bord des navires et des filtres pour les installations plus modestes.

Notons que l'on ne transforme pas un fuel-oil domestique en un gas-oil par filtrage, ou même par centrifugation, et qu'une analyse de laboratoire ne peut déceler des différences entre les caractéristiques physiques d'un fuel-oil domestique avant et après centrifugation; l'épuration porte en effet sur des quantités trop petites et de l'ordre de grandeur des erreurs de mesure en laboratoire.

Il est plus indiqué de faire une analyse, non pas sur le combustible même avant et après centrifugation, mais bien sur le résidu de cette centrifugation, à la condition toutefois de connaître la proportion du résidu extrait du combustible consommé.

Le filtrage après décantation élimine l'eau et les impuretés solides qui peuvent se trouver dans les fuels jusqu'à des dimensions de l'ordre de 10$\mu$, il n'agit absolument pas sur la teneur en cendres, le conradson et le soufre, il n'agit que très peu sur la teneur en asphaltes. L'ennemi du filtre est la paraffine qui l'encrasse et anihile son action; il semble aussi que l'acidité organique des gas-oils et fuels, constituée par l'acide naphténique en favorisant l'absorption d'humidité, ait une action sur l'encrassement des filtres.

L'épuration centrifuge à bord des navires de grande pêche se fait normalement en deux temps, le combustible, mélangé de 1 à 3 pour mille d'eau distillée et après avoir été réchauffé entre 80 et 90° C, passe dans le premier épurateur où il se débarrasse de son eau, des sédiments, d'une partie de ses cendres (les sulfates solubles) et d'un peu d'asphalte, passe après un second réchauffage dans le clarificateur où l'épuration se complète.

Le mélange d'eau distillée facilite l'évacuation des cendres, la proportion d'asphaltes enlevée dépend en grande partie du débit de la centrifugeuse; si l'on réduit celui-ci notablement on peut arriver à éliminer 25 à 30 % des asphaltènes. Les cendres éliminées par une bonne centrifugation peuvent se chiffrer par 15 ou 20 % des cendres totales, quoique certains constructeurs prétendent en éliminer 90 %. Les caractéristiques conradson et soufre du combustible ne sont pas influencées par la centrifugation. La quantité totale de résidus d'épuration est de l'ordre de 7 à 8 pour 10 000 du combustible à épurer dont 5 à 6 sont extraites par l'épuration centrifuge et 1 à 2 par le clarificateur.

En conclusion, nous pouvons dire que l'épuration des combustibles est une nécessité, que les installations d'épuration (filtrage ou centrifugation) sont économiquement payantes; elle peut permettre dans beaucoup de cas d'utiliser avec satisfaction des fuels lourds, et qu'enfin les frais d'usure et d'entretien du moteur sont toujours réduits.

## INDICE CONRADSON

Cette caractéristique représente ce qui reste d'une distillation du combustible dans un creuset à l'abri de l'air; il donne une idée de la quantité de produits difficiles ou impossibles à brûler et se compose de particules de coke, d'asphaltènes et de cendres. L'utilisation d'un combustible à indice conradson élevé allonge la combustion comme le montrent les diagrammes d'indicateurs. On observe de plus une relation assez nette entre l'encrassement général du moteur et la valeur de cet indice, les dépôts étant constitués par des particules de coke, cendres, asphaltes durs et mous, laques, résines, le tout mélangé à l'huile de graissage.

Plus particulièrement il y a aussi une relation entre l'indice conradson du combustible et l'aptitude à la formation de trompettes de coke au nez des injecteurs.

Nous avons vu que ces "trompettes" de coke étaient extrêmement gênantes, car elles ont tendance au fur et à mesure de leur formation à resserrer l'angle du jet, ce qui se traduit par une mauvaise répartition dans la chambre de combustion. On peut pallier en partie cet inconvénient par refroidissement de l'injecteur.

Il est à noter que le dessin des injecteurs des moteurs devant utiliser des combustibles lourds doit tenir compte de deux conditions qui semblent contradictoires : d'une part être convenablement refroidi pour éviter la formation de "trompettes" au nez de l'injecteur consécutif au conradson du combustible, et d'autre part la nécessité d'injecter le combustible "chaud" pour des raisons de viscosité.

Les normes administratives n'indiquent pas de maximum pour l'indice conradson, commercialement elles sont toujours inférieures à 0, 8 % pour le gas-oil, inférieures à 2 % pour le fuel-oil domestique, inférieures à 5 % pour le fuel-oil léger.

Pour le Diesel-oil destiné au ravitaillement des navires les raffineurs s'imposent un maximum de 1, 5. Les gas-oils étant des distillats à conradson très faible, on effectue souvent cette mesure sur les

dix derniers pour cent distillés, le conradson d'un gas-oil dans ces conditions est de l'ordre de 0, 15 à 0, 2 %.

## SOUFRE

Les constructeurs européens ont tous constaté depuis 1944, et ceci malgré les progrès de la métallurgie, un accroissement général de l'usure des chemises des moteurs Diesel, cette tendance s'accentue semble-t-il encore actuellement, et ceci même avec les combustibles comme le gas-oil. Une première cause réside probablement côté moteur en l'accroissement des pressions moyennes, du côté combustible, en l'évolution des procédés de raffinage qui tendent à augmenter le rendement en essence des bruts, au détriment des produits lourds, et aussi en le déplacement vers le Moyen-Orient du centre mondial de production du brut, ce brut étant particulièrement riche en soufre.

Les moyennes comparées de produits similaires pendant la période 1938-1944 et 1945-1952 ont montré qu'à densité sensiblement équivalente, les taux de cendres et de conradson n'ayant que peu augmenté, les teneurs en soufre avaient plus que doublé et quelquefois triplé.

Cet accroissement d'usure a été particulièrement mis en relief par l'exemple d'un moteur Fiat 10 cylindres 750 mm d'alésage, toujours en fonctionnement depuis 1936, pour le même service et avec les mêmes matériaux, et dont l'usure moyenne était, de 1936 à 1943, de 0, 065 mm par 1000 heures de fonctionnement, cette usure est passée à 0, 08 de 1943 à 1949 et à 0, 12 mm de 1949 à 1951. Les usures s'accroissent alors qu'elles devraient normalement décroître avec le temps.

L'augmentation de ces usures est attribuée au soufre du combustible, et d'autres essais viennent de plus en plus confirmer cette opinion. Ricardo dès 1933 avait énoncé cette hypothèse de l'usure des cylindres par corrosion due aux composés sulfurés du combustible.

Les composés sulfurés existent dans les combustibles sous formes diverses, mercaptans polysulfures, tiophène plus ou moins transformé et modifié par le raffinage.

La forme de ces composés importe d'ailleurs assez peu puisqu'en présence d'un excès d'oxygène, comme c'est le cas dans un diesel, les produits de combustion sont, suivant une réaction d'équilibre $SO_2$

et $SO_3$, en proportions variables suivant la température et la pression.

EFFETS DU SOUFRE

Ces effets se produisent à froid, moteur arrêté, et à chaud, moteur en fonctionnement; ils semblent être d'autant plus importants que le régime est plus rapide et la cylindrée plus faible et sensiblement indépendante de l'architecture du moteur.

Les effets à froid sont connus depuis longtemps, ils consistent en un effet de corrosion directe par $SO_4H_2$ formé par la condensation de l'eau et de la dernière charge de gaz brûlé.

Les effets à chaud, contrairement à ce que l'on pensait auparavant, semblent beaucoup plus importants, ils se traduisent par une augmentation des dépôts, un durcissement de ceux-ci par une sorte de vulcanisation, par des gommages de segments, formation de vernis et enfin usure.

Les proportions relatives de $SO_2$ et $SO_3$ formées sont difficilement mesurables, certains auteurs pensent qu'en marche normale elle peut atteindre 90 % de $SO_3$, en tout cas l'action de $SO_3$, semble prédominante.

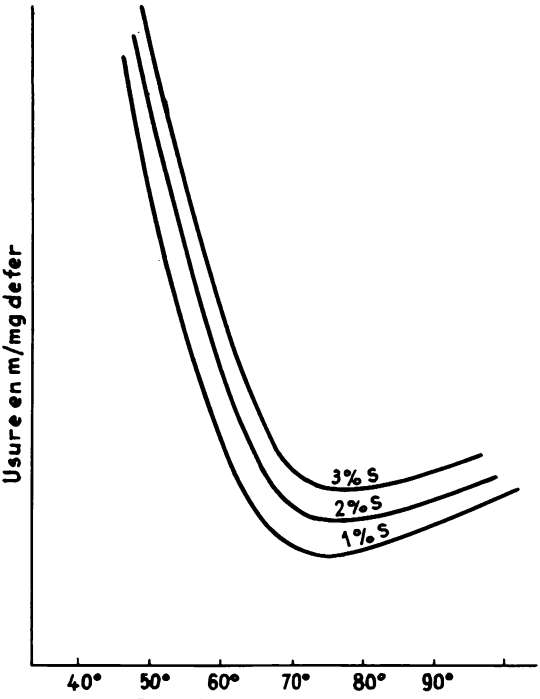
On a longtemps pensé que la corrosion par condensation ne pouvait se produire qu'à une température inférieure à celle du point de rosée correspondant à la tension de vapeur d'eau dans la chambre de combustion, elle est en fait celle des vapeurs acides plus ou moins diluées et nettement plus élevées que celles de la vapeur d'eau seule (de l'ordre de 140° C). Ce fait explique notamment pourquoi l'usure par corrosion diminue lorsque la température des parois du cylindre s'élève, la quantité de vapeur acide condensée diminuant et aussi l'emplacement de l'usure maxima d'une chemise qui tend à s'éloigner du point mort haut quand le facteur de charge du moteur augmente.

La présence effective d'acide sulfurique a d'ailleurs été mise en évidence, d'une part par l'introduction dans le moteur de petites piles zinc-cuivre, et d'autre part par examen microscopique direct qui ont décelé la présence sur les fonds de pistons de gouttes minuscules de $SO_4H_2$ emprisonnées dans des dépôts.

Les courbes de la figure ci-après donnent l'allure générale de l'usure des chemises en fonction de la température de sortie d'eau pour différentes teneurs en soufre du combustible.

Nous voyons qu'aux faibles températures l'usure est considérable, elle s'abaisse ensuite pour passer par un minimum vers 70° C à 75° C selon les moteurs, elle remonte ensuite vers les températures élevées.

L'usure, à gauche, du minimum est en majeure partie due à la corrosion par $SO_2$ et $SO_3$, à droite de ce minimum cette usure provient surtout d'abrasion par durcissement des dépôts (vulcanisation) et est fonction non seulement de la teneur en soufre, mais aussi de la caractéristique "conradson du combustible.




Allure générale des courbes d'usure en fonction du soufre et de la température.

L'examen de ces résultats pose un problème pour les moteurs marins : d'une part la tendance des chefs mécaniciens est de "marcher froid" et de l'autre que le refroidissement à l'eau de mer ne permet pas d'aller au-delà de 60° C par suite des dépôts de sels qui peuvent se produire dans le circuit de refroidissement. Ce fait condamne le système du refroidissement à l'eau de mer et tous les constructeurs s'organisent maintenant pour refroidir à l'eau douce avec système de régulation thermostatique de la température et by-pass pour fonctionnement aux charges réduites.

Les seuls moyens efficaces que nous ayons actuellement pour pallier les effets nocifs du soufre sur l'usure, en dehors des questions de métallurgie, sont :

1° Le dopage des combustibles avec des composés organiques basiques tels que le naphténate de soude, aniline, etc. Ce dopage n'est pratiquement pas possible étant donné les pourcentages élevés (2 à 5 %) de dopes à utiliser et les tonnages de fuel mis en jeu.

2° L'addition de dopes aux huiles de graissage, plus pratique et plus efficace que le dopage du combustible.

Les huiles dopées anti-soufre procèdent de deux tendances : l'une à action chimique consiste à neutraliser la pellicule d'acide formée à chaque cycle par un dope basique, ce dope s'épuise et de basique qu'elle était au départ l'huile en s'usant redevient acide, ces huiles contiennent un pourcentage de dope assez élevé et on leur reproche une teneur en cendres relativement importante. L'autre, dont l'action est physique et qui consiste, en renforçant l'onctuosité, à éviter le plus complètement possible la rupture du film d'huile formant écran aux vapeurs acides.

3° Le contrôle rigoureux des conditions de refroidissement des moteurs. On voit en effet par l'examen des courbes qu'il peut être plus avantageux de fonctionner avec un fuel à 3 % de soufre à 75° C de refroidissement qu'avec un fuel à 1 % de soufre à 55° C.

Cette nécessité de "marcher à chaud" s'accentue avec la tendance actuelle des gros moteurs marins qui est d'utiliser des combustibles lourds.

4° Enfin, le moyen le plus radical serait évidemment d'éliminer par traitement le soufre du brut. Il existe de nombreux moyens, mais tous d'un prix de revient prohibitif. Des recherches sont faites dans ce sens, mais encore faudrait-il que les ressources nouvelles en soufre à partir du pétrole soient payantes.

Les teneurs en soufre des combustibles du marché français sont les suivantes :

| | |
|---|---|
| Pour le gas-oil | inf. à 1, 3 % souvent inf. à 1 % |
| Pour le fuel-oil domestique | inf. 1, 9 % souvent inf. à 1, 3 % |
| Pour le Diesel-oil | inf. 1, 8 % |
| Pour le fuel-oil léger | inf. à 2, 7 % |
| Pour le fuel-oil n° 1 | inf. à 3, 5 % |
| Pour le fuel-oil n° 2 | inf. à 4 % |

## REMARQUES SUR L'USURE DES CHEMISES DE CYLINDRE DU MOTEUR DIESEL

Nous avons fait ressortir ci-dessus l'action du combustible sur l'usure des chemises et notamment l'importance des caractéristiques: asphaltes, soufre, cendres, il ne faudrait pas en déduire que le combustible seul est responsable de cette usure, les autres facteurs d'usure peuvent être les suivants :

1. Facteurs dépendant de l'architecture du moteur et de son dessin:

a) Alésages;
b) Vitesse moyenne des pistons;
c) Pressions moyennes effectives;
d) Type de réfrigération des chemises et pistons;
e) Forme de la chambre de combustion;
f) Système d'injection;
g) Système de graissage;
h) Efficacité du balayage et de la suralimentation.

2. Facteurs dépendant des huiles de graissage :

a) Résistance à l'oxydation et polymérisation à haute température;
b) Utilisation d'huile anti-soufre.

3. Facteurs dépendant de la métallurgie des chemises et segments - état de surface - fini de fabrication.

4. Facteurs dépendant du genre de service :

a) Conditions de charges et de surcharges;
b) Démarrages fréquents ou non;
c) Fréquence et durée des arrêts.

5. Facteurs dépendant de la capacité et de l'entraînement du personnel.

## EFFETS SECONDAIRES DU SOUFRE

La désulfuration a pour effet d'augmenter légèrement le pouvoir calorifique et l'indice de cétane des fuels.

C'est qu'en effet la combustion du soufre ne dégage que 7 000 calories par kilogramme contre 11 000 pour un combustible sans soufre.

L'augmentation de l'indice de cétane par désulfuration est faible, de l'ordre de deux points.

## CONGELATION

Les mesures de point de trouble et de congélation sont empiriques. La première est la température d'apparition de cristaux de paraffine ou d'autres produits insolubilisés par abaissement de température, la deuxième est la température pour laquelle la tendance à l'écoulement

est nulle. Le point de trouble est à considérer pour l'aptitude au colmatage des filtres par les cristaux de paraffine; le point de congélation doit être considéré pour déterminer les conditions de réchauffage.

## Indice de cétane et congélation

Lorsque l'indice de cétane d'un combustible augmente, en général le point de congélation augmente aussi. Nous avons vu en effet, à propos de l'indice de cétane, que celui-ci était fonction d'une certaine instabilité thermique ou aptitude à "craquer" et l'on sait que les paraffiniques à hauts points de congélation donnent les plus hauts indices de cétane.

L'indice Diesel varie d'ailleurs dans le même sens, il est fonction du point d'aniline, et l'on sait que plus le point d'aniline est élevé plus le caractère paraffinique du combustible est élevé.

Les points de congélation des combustibles Diesel du marché français sont assez élevés, étant donné le caractère paraffinique des bruts du Moyen-Orient; ils sont normalement les suivants :

Inférieur à -7° pour le gas-oil;
Inférieur à -3° pour le fuel-oil domestique;
Inférieur à 0° pour le fuel-oil léger.

Pour les fuels lourds n° 1 et n° 2, la congélation n'est pas définie dans les spécifications puisqu'il y a obligation de réchauffage; néanmoins elle est généralement comprise entre 0 et + 10° C et peut même être nettement plus élevée avec certains résidus très paraffiniques.

## Réchauffage

Le réchauffage est particulièrement important pour l'utilisation des combustibles lourds dans les diesel. Il y a lieu dans ce cas de considérer trois réchauffages successifs :

1. Réchauffage dans les soutes ou bacs de stockage pour faciliter le travail des pompes d'alimentation et l'écoulement dans la canalisation jusqu'aux caisses de relai ou de décantation;

2. Réchauffage pour amener le combustible à température convenable afin d'éliminer par centrifugation le maximum de cendres, d'asphaltes, durs et mous, et ceci dans des limites assez étroites

généralement comprises entre 80° et 90° C. Ces systèmes de réchauffage sont généralement électriques et munis d'un thermostat;

3. Enfin, nous avons vu à propos de la caractéristique "viscosité" et "conradson" qu'il y avait lieu,pour tenir compte de la viscosité sous pression au moment de l'injection,de réchauffer suffisamment pour obtenir une viscosité d'environ 2° Engler à l'injecteur, conditionnant la bonne pulvérisation du combustible. Ceci suppose un troisième dispositif de réchauffage qui est d'ailleurs rarement réalisé, mais qui peut devenir une nécessité si l'on veut utiliser dans de bonnes conditions les combustibles lourds.

## INFLAMMABILITE

Cette caractéristique ne présente aucun intérêt pour le fonctionnement du moteur; elle caractérise seulement la sécurité d'emploi du combustible, lorsqu'il doit être réchauffé.

L'inflammabilité Luchaire doit être supérieure à 70°, chiffre fixé par les spécifications françaises.

Elle est normalement de 70° à 120° C pour le gas-oil, de 70° à 140° C pour le fuel-oil domestique, Diesel-oil, fuel-oil léger, fuel-oil n° 1 et peut aller jusqu'à 160° C pour le fuel-oil n° 2.

## COULEUR

On ne peut absolument pas se fier à la couleur pour juger de la qualité d'un combustible. Certains gas-oils, quoique assez foncés, sont d'excellente qualité, ce qui importe c'est qu'il soit limpide sans trace de "louche" signe d'humidité.

Le fuel domestique est obligatoirement coloré en rouge. Les autres fuels sont normalement noirs.

Il est à noter que la couleur d'un produit s'examine par transparence, alors que le reflet est la couleur perçue par lumière réfléchie sur le produit.

Quatrième partie

# LES HUILES COMBUSTIBLES POUR TURBINES A GAZ INDUSTRIELLES

## GENERALITES

Les turbines à gaz industrielles dont les avantages par rapport au diesel sont : prix moins élevé, rapidité de mise en marche, encombrement réduit, absence d'eau pour l'alimentation ou le refroidissement, couple au démarrage élevé, absence de vibrations. En revanche, la consommation des turbines à gaz est nettement supérieure à celle du diesel, d'où l'utilisation obligatoire de combustibles résiduels si l'on veut obtenir des prix de revient acceptables.

Le champ d'application des turbines à gaz découle directement des qualités et défauts mentionnés ci-dessus, par exemple :

a) Centrale électrique de pointe ou groupe de réserve en raison du prix relativement réduit et de la rapidité de mise en route.

b) Propulsion des navires en raison du volume réduit améliorant le volume utile de cargaison, facilité d'entretien et absence de vibrations.

c) Traction sur voie ferrée en raison du volume réduit et du couple au démarrage élevé. Il semble à ce sujet que la solution par transmission mécanique puisse être développée, les transmissions électriques étant d'un prix extrêmement élevé.

d) Générateurs auxiliaires et groupes compresseurs.

e) Générateur à gaz à pistons libres accouplés à une turbine à gaz dont l'intérêt réside en ce que l'énergie libérée à haute température est utilisée directement dans le moteur-compresseur, la turbine ne recevant des gaz qu'à température relativement réduite, et échappant par là à tous les inconvénients de dépôts signalés ci-dessous.

## CARACTERISTIQUES PRINCIPALES DES FUELS POUR TURBINES A GAZ INDUSTRIELLES

En dehors des caractéristiques commerciales courantes, les deux plus importantes sont la teneur en soufre et les cendres; dans ces dernières, la teneur en vanadium et en sodium sont les plus importantes. Ces trois caractéristiques : soufre, vanadium, sodium, sont en relations étroites avec les inconvénients de corrosion et de dépôts dans les chambres de combustion dans les ailettes et les tubes d'échangeurs. Elles limitent actuellement l'utilisation de hautes températures génératrices de rendements élevés.

### LE SOUFRE

Généralement plus de 1 % engendre la formation de sulfates peu volatiles, donc des dépôts peu sensibles aux variations de température. Il peut agir par corrosion sulfurique à l'arrêt ou aux démarrages par suite des condensations, mais son effet s'effectue principalement pendant la combustion. En atmosphère alternativement réductrice et oxydante, les sulfures formés pendant les périodes réductrices s'oxydent sans former de couches continues et peuvent donner lieu à la formation de sulfates pâteux qui restent fixes sur les ailettes en présence d'éléments tels que le sodium.

Aux températures élevées, le soufre peut donner lieu à des corrosions fissurantes, notamment sur les alliages à base de nickel.

### TENEUR EN CENDRES

La teneur et la composition des cendres constituent des caractéristiques auxquelles on attache actuellement la plus grande importance.

Tous les mélanges résiduels contiennent des matières minérales qui donnent des cendres après combustion en quantités variant de traces à environ 0, 2 % en poids. Cette faible quantité est néanmoins une des causes principales du mauvais fonctionnement des turbines à gaz.

L'analyse des cendres révèle beaucoup d'éléments, notamment, le silicium, le fer, le cuivre, le magnésium, le potassium, le sodium et le vanadium, ainsi que des traces de la plupart des métaux rares.

Les ennuis sont de deux types principaux :

a) Adhérence des composés cendreux aux surfaces métalliques (ailettes, tubes d'échangeur).

b) Fusion des cendres dans la chambre de combustion, avec, par action catalytique, formation de scories ou fusion du revêtement réfractaire de la chambre de combustion.

Parmi tous les composés se trouvant dans les cendres, les deux plus nocifs sont le vanadium et le sodium.

### Influence du vanadium

L'influence corrosive du vanadium est due à l'action de son oxyde ou de ses composés, vanadates, qui fondent à basse température (point de fusion $V^2 0^5$ : 650° C) sont entraînés à l'état liquide, adhèrent aux ailettes et accélèrent l'oxydation en dissolvant les oxydes protecteurs au fur et à mesure de leur formation. La présence dans les cendres de composés alcalins ou de soufre, qui donnent des fusibles et abaisse la viscosité du mélange, accélère la corrosion.

### Influence du sodium

Le sodium, qui n'a par lui-même pratiquement pas d'action corrosive, agit principalement en association avec le vanadium ou le soufre en donnant, soit des vanadates de sodium à bas points de fusion qui accentuent les effets de la corrosion, soit des dépôts de sulfates par eux-mêmes peu corrosifs, mais dont l'accumulation freine l'écoulement des gaz en réduisant la puissance.

L'introduction d'eau de mer dans les fuels pour turbines marines peut accentuer les dépôts de sulfates par réaction entre le chlorure de sodium et les composés oxygénés du soufre.

L'association dans les cendres de vanadium et de sulfates alcalins accélère l'écaillage et la sulfuration; si le vanadium domine dans les cendres l'attaque est plus importante dans le cas des aciers que dans le cas des alliages à base de nickel; inversement, si le soufre domine, les effets de la corrosion sont plus graves dans le cas des alliages à base de nickel.

## SOLUTIONS PERMETTANT DE REDUIRE LES EFFETS DES IMPURETES DANS LES COMBUSTIBLES

1, Elimination des cendres par passage des gaz dans un cyclone ou par précipitation électrostatique; cette solution est à peu près

inapplicable en raison des vitesses de gaz très élevées provoquant une perte de charge considérable.

2. Par contrôle du régime de combustion.

Dans le cas où le soufre est l'impureté prédominante, le maintien d'un régime de combustion franchement oxydant permet de réduire les effets de la corrosion par les gaz, mais, en contrepartie, peut augmenter les risques de corrosion sulfurique des aciers à l'arrêt.

Dans le cas où le vanadium est présent dans les cendres, une combustion incomplète permet au contraire de réduire l'influence corrosive de cet élément. Les poussières de carbone qui sont entraînées avec les cendres diminuent l'adhérence sur les ailettes et tendent à réduire les oxydes de vanadium en donnant des sous-oxydes à points de fusion plus élevés. Il y a en contrepartie diminution du rendement de combustion (environ 1 %).

3. Additions dans le combustible. On a cherché à neutraliser les effets du vanadium par l'addition dans le combustible de composés réagissant avec les oxydes de vanadium dans la zone de flamme en donnant des produits à point de fusion plus élevé et moins adhérents, par exemple, des silicates d'éthyle, oxyde de zinc ou de magnésium.

Les résultats ne sont pas très probants et les recherches continues.

On se heurte donc actuellement au seuil de 650° C, au-delà duquel les inconvénients dus aux dépôts se manifestent. Ce fait donne une importance toute particulière à la solution générateurs à pistons libres accouplés à une turbine à gaz à moins de 650° C.

Cinquième partie

# COMBUSTIBLES POUR FUSEES

## GENERALITES

Nous ne pouvons terminer ce cours sans donner quelques indications succinctes sur les combustibles pour fusées. L'évolution des techniques est rapide, et si nous assistons actuellement à la disparition progressive de l'aviation à moteurs à pistons, il faut prévoir également que l'aviation de bombardement à réaction sera remplacée à brève échéance par des fusées.

Celles-ci exigent des combustibles à forte "énergie interne" et il se passera peu de temps avant que ces combustibles eux-mêmes ne soient remplacés par l'énergie atomique enfin domestiquée.

Toute estimation de combustibles "possibles" doit commencer par une comparaison des pouvoirs calorifiques par unité de poids; ceux-ci sont mentionnés dans le tableau suivant :

| Pouvoirs calorifiques inférieurs : (kcal/kg) | |
|---|---|
| Hydrogène | 28 900 |
| Diborane | 17 900 |
| Hydrure de béryllium | 17 700 |
| Pentaborane | 16 800 |
| Tétraborane | 16 800 |
| Béryllium | 16 300 |
| Décaborane | 15 700 |
| Diborane méthylique | 14 600 |
| Bore | 14 600 |
| Diborane éthylique | 14 000 |
| Diborane tétraéthylique | 11 800 |
| Borane triéthylique | 11 200 |
| Essence | 10 500 |
| Hydrure de lithium | 10 400 |
| Kérosène (JP 4) | 10 350 |

| Pouvoirs calorifiques inférieurs : (kcal/kg) (suite) | |
|---|---|
| Lithium | 10 300 |
| Carbone | 8 100 |
| Aluminium | 7 450 |
| Silice | 7 400 |
| Alcool éthylique | 6 400 |
| Magnésium | 5 960 |
| Furfurol | 5 300 |
| Hydrazine | 4 750 |
| Titane | 4 600 |
| Ammoniac | 4 500 |

L'hydrogène est de loin celui qui a le meilleur rendement puisque son énergie disponible par unité de poids est trois fois plus élevée que celle du kérosène ou de l'essence; malheureusement son emploi soulève des problèmes presque insurmontables de compression. De plus, son énergie disponible par unité de volume est très faible et ce seul fait suffit à l'éliminer.

Un autre moyen d'obtenir des combustibles à haute énergie consisterait à remplacer les atomes de carbone de la molécule de carbone d'hydrogène par un élément ayant un pouvoir calorifique au kilo plus élevé, par exemple le béryllium, le bore, le lithium. Le premier est rare, forme des composés toxiques et se combine difficilement à l'hydrogène. Par contre, le bore et le lithium forment des composés hydrogénés (hydrures) intéressants.

Les hydrures de bore, diborane, pentaborane, décaborane, sont susceptibles de développer une énergie au kilo atteignant 70 % de plus que le kérosène. Les problèmes de stabilisation et de toxicité posés par l'utilisation de ces composés sont, paraît-il, maintenant résolus, et le "Hical" composé solide de fabrication américaine, semble donner satisfaction.

INSTITUT FRANÇAIS DU PETROLE
1 et 4, avenue de Bois-Préau
RUEIL-MALMAISON (Seine-et-Oise)

Dépôt légal :
4e trimestre 1963

Achevé d'imprimer en Octobre 1963
N° d'ordre éditeur : 93

VAN SEVEREN